ENDEAVOUR

Revue trimestrielle destinée à tenir registre du progrès
des sciences au service du genre humain

VOLUME VII AVRIL 1948 NUMÉRO 26

Macromolécules

De tous les phénomènes naturels, celui de la vie est le plus mystérieux. « La véritable étude du genre humain est celle de l'homme » est un aphorisme que le savant peut appliquer à son domaine comme signifiant que le but principal de la science est la définition de l'ensemble des propriétés qui distinguent la vie de la mort. On peut aborder le problème par différentes voies, mais c'est, jusqu'à présent, la chimie organique qui a donné les meilleurs résultats. C'est probablement une des raisons qui font qu'elle a toujours eu une foule de disciples enthousiastes: les substances organiques sont en relation si étroite avec la vie et les besoins fondamentaux de l'homme qu'elles ont un attrait tout différent de celui des composés minéraux.

Il y a quelques années la chimie organique paraissait cependant être arrivée à une impasse dans sa découverte du mécanisme de la vie. Celui qui étudiait ce sujet trouvait avec satisfaction les vastes connaissances accumulées pendant les cent dernières années. Mais sa satisfaction était quelque peu troublée par le fait désappointant que dans le cas de plusieurs composés organiques particulièrement importants et intéressants — comme les protéines, le caoutchouc, l'amidon — on ne trouvait que des descriptions générales. On connaissait les grandes lignes de leur structure, mais les détails étaient obscurs et l'espoir de les préparer par synthèse semblait lointain. Ainsi, par exemple, dans le domaine de la chimie des protéines on avait réussi à joindre quelques amino-acides pour former des polypeptides simples; malgré tout l'intérêt de ces travaux pour confirmer et compléter nos connaissances sur les protéines, seul le chimiste le plus optimiste pouvait croire sérieusement que, par une simple extension de ce processus, on arriverait à une bonne méthode de synthèse. On se heurtait aux mêmes problèmes dans chaque branche de la chimie organique comportant l'étude de très grosses molécules; les méthodes dont on disposait étaient insuffisantes et ne permettaient ni de déceler le détail de la structure ni l'espoir de réaliser des synthèses, même dans le cas d'une structure déterminée. Il était évident que la science avait atteint des régions pour lesquelles elle n'était pas équipée.

La difficulté ne fut que temporaire et, comme cela s'est souvent produit dans le passé, de nouveaux progrès furent enregistrés grâce, d'une part, à l'application des notions acquises et, de l'autre, à des idées tout-à-fait inédites et à des techniques perfectionnées. On avait surtout besoin de meilleures méthodes pour étudier la structure des grosses molécules et réaliser leur synthèse. Ces lacunes furent rapidement comblées. Parmi les nouvelles techniques celle de l'analyse par les rayons X est particulièrement remarquable. Elle a été un instrument d'une incomparable valeur pour la détermination de la nature du groupement périodique dans les molécules à chaîne longue et, de plus, elle a permis, sous sa forme la plus récente, d'établir la configuration atomique complète de très grandes molécules non-polymérisées, telles que celles du cholestrol et de la pénicilline.

Un autre instrument de grande valeur pour l'étude des grosses molécules est l'ultracentrifuge, dont le développement a été l'œuvre d'un groupe de chercheurs à la tête desquels est The Svedberg, dont un article sur ce sujet a été publié par ENDEAVOUR en 1947. Une autre méthode d'analyse donnant d'excellents résultats, particulièrement dans le cas des protéines, est la séparation chromatographique, mise au point par A. J. P. Martin et ses collaborateurs (ENDEAVOUR, janvier 1947). Celle-ci a permis l'analyse semi-quantitative de protéines en quantités lilliputiennes, bien inférieures à ce que l'on aurait cru nécessaire il n'y a même que cinq ans. L'emploi de cette

méthode a déjà fourni un grand nombre de renseignements sur les résidus amino-acides de diverses protéines ainsi que sur certains détails de structure, et il est évident que le procédé offre d'immenses possibilités dans ce domaine.

Les recherches sur la synthèse des macromolécules ont avancé à la même cadence que celles sur l'analyse. Il y a quarante ans on savait relativement peu de choses sur le mécanisme de la polymérisation et il n'existait pas de marché pour les polymères artificiels. Dans la plupart des cas on considérait la polymérisation comme une réaction secondaire ennuyeuse en ce qu'elle gênait des recherches plus importantes. Aujourd'hui le tableau est tout différent. Une connaissance largement développée de la structure des polymères naturels a fait avancer la chimie théorique et a, en même temps, accru le nombre des applications pratiques de ces substances. La fabrication des polymères est devenue une branche importante de l'industrie chimique et beaucoup de ces nouveaux produits tiennent une place marquante dans notre existence quotidienne.

Ces importants résultats ont été acquis, d'une part par la perfection des nouveaux procédés d'analyse et de synthèse et, de l'autre, par l'apparition de vues nouvelles sur la synthèse des grosses molécules. On s'est rendu compte de la difficulté pratique de souder successivement de petits groupements, tels les sucres ou les amino-acides, pour former de très grosses molécules à poids moléculaire atteignant des dizaines de mille. Au lieu de cela, on a concentré les recherches sur la polymérisation régulière et rapide, sans accompagnement de réactions latérales indésirables. Le caoutchouc artificiel, le Perspex, le Polythène et les résines de silicones ne représentent que quelques-uns de ces nombreux polymères découverts au cours des toutes dernières années.

Il reste à voir jusqu'à quel point la polymérisation contrôlée de substances simples, ou de mélanges de substances simples, peut être employée pour la synthèse exacte de polymères naturels tels que les protéines. Nous savons que bien que beaucoup de polymères naturels puissent être constitués par un nombre relativement peu élevé de groupements de différentes sortes — une douzaine d'amino-acides différents, par exemple — l'ordre et la fréquence de leur arrangement peut être très complexe. Pour obtenir par polymérisation directe des groupements simples un ordre et une fréquence définis, il serait nécessaire de contrôler les réactions avec plus de précision que nous ne pouvons encore le faire. Actuellement la synthèse de polymères présentant la même configuration générale que les polymères naturels et doués, par conséquent, de propriétés du même genre, est tout ce que l'on peut faire. Il est possible que l'imitation parfaite au laboratoire des polymères naturels doive attendre la découverte de méthodes inconnues jusqu'à ce jour.

L'article principal du présent numéro a pour auteur le professeur Linus Pauling, et traite des anticorps et des forces biologiques spécifiques — domaine dans lequel ses travaux personnels sont bien connus. Cet article illustre en même temps l'étendue de nos connaissances sur les macromolécules et montre le rapport étroit qui existe entre des branches de la science qui, il y a quelques années seulement, semblaient diverger. La théorie quantique, avancée à l'origine pour expliquer certaines particularités du rayonnement des corps noirs, s'est montrée d'une valeur inestimable pour élucider la nature de la liaison chimique. La compréhension des forces qui relient entre eux les atomes et les molécules fait espérer qu'il sera possible un jour d'exprimer le phénomène de vie en fonction de la structure moléculaire de l'organisme. Nul problème n'est plus fondamentalement important en science que celui de la relation entre anticorps et antigène, et nul ne présente une importance pratique supérieure en médecine. Le fait qu'il soit maintenant possible de discuter cette relation en fonction d'une théorie scientifique établie permet de mesurer la rapidité avec laquelle l'étude des macromolécules a progressé au cours des dernières années. Une nouvelle étape a été couverte sur le chemin de l'étude de la vie grâce à l'habileté d'invention, « la méditation profonde, et l'application simultanée aux objets étudiés de l'équilibre de la sincérité d'observation et d'une faculté imaginative d'adaptation.»

Rédacteur en chef: E. J. HOLMYARD, M.A., M.Sc., D.Litt., F.R.I.C.
Rédacteur adjoint: TREVOR I. WILLIAMS, B.A., B.Sc., D.Phil.
Pour les éditions étrangères: J. A. WILCKEN, B.Sc., Ph.D.

Imperial Chemical Industries, Nobel House, Buckingham Gate, London, S.W.1

Anticorps et forces biologiques spécifiques

LINUS PAULING

Les progrès réalisés en chimie au cours des cent dernières années ont donné la possibilité d'identifier la structure de bien des substances simples trouvées dans la cellule vivante. Mais ce n'est que depuis peu que l'on a pu croire, avec de sérieux motifs à l'appui, que la science et la technique avaient atteint un développement suffisant pour permettre éventuellement la résolution de problèmes aussi complexes que ceux de la relation entre anticorps et antigène et des phénomènes fondamentaux de la vie.

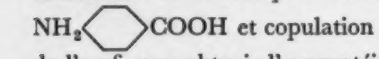
On a fait récemment des progrès importants dans l'étude du problème de la nature des forces biologiques spécifiques ainsi que dans le problème connexe du mécanisme de formation de molécules biologiques complexes, douées de propriétés spécifiques. Les animaux, par exemple, sont capables de faire la synthèse de diverses protéines à fonctions spéciales — telle l'hémoglobine qui transporte l'oxygène des poumons jusqu'aux tissus. Sa molécule est grosse et complexe. Elle contient environ 10.000 atomes et son poids moléculaire est 60.000. Elle a la propriété de se combiner de façon réversible avec l'oxygène et tend, en présence d'acide carbonique, à libérer l'oxygène combiné. Les propriétés de l'hémoglobine ne sont pas exactement semblables pour des animaux d'espèces différentes, mais varient d'une espèce à l'autre. Dans certains cas la nature de cette différence est visiblement avantageuse pour l'animal — ainsi, l'hémoglobine des poissons d'eau froide libère son oxygène à des températures plus basses que celle des animaux à sang chaud.

Le problème relatif à la manière dont l'animal est capable de fournir la molécule spéciale d'hémoglobine dont il a besoin est un point particulier du problème général de l'élaboration des substances biologiques spécifiques. Par exemple, une molécule de virus dans un milieu approprié (celui que lui fournit son hôte) est capable de provoquer la production de corps identiques à lui-même et les phénomènes d'hérédité dépendent d'une action autocatalytique similaire des molécules de gènes présentes dans les chromosomes et dans le cytoplasme des cellules.

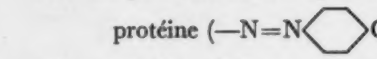
On observe dans beaucoup d'autres phénomènes cette spécificité dont fait preuve le système de synthèse des cellules pour l'élaboration de molécules d'hémoglobine d'un type particulier ou d'autres substances complexes à propriétés biologiques spécifiques. Les plantes et les animaux forment des enzymes douées du pouvoir spécial de catalyser certaines réactions chimiques, telles que l'hydrolyse d'une chaîne polypeptidique à la liaison entre deux résidus amino-acides définis, ou encore les stades successifs de l'oxydation des matières alimentaires. Un exemple frappant de la spécificité est fourni par les anticorps qui sont des substances produites par un animal après qu'on lui a injecté un corps étranger, l'antigène. En général, les anticorps produits par réaction après injection d'un antigène particulier, ont la propriété de se combiner avec l'antigène correspondant employé à leur production, mais pas avec d'autres substances à l'exception de celles qui ont une structure moléculaire très voisine. Le problème de la structure des anticorps du point de vue de leur propriété de spécificité de combinaison avec l'antigène correspondant et du mécanisme de leur formation, se rattache ainsi aux deux problèmes biologiques fondamentaux dont il a été question plus haut.

Les travaux de Karl Landsteiner contribuèrent dans une large mesure à l'établissement des notions actuelles sur la nature des réactions sérologiques. Après sa découverte des groupes sanguins chez l'homme, Landsteiner entreprit une série de recherches expérimentales approfondies dans le but d'élucider les problèmes relatifs à la nature des réactions sérologiques. Il découvrit un fait important, celui de la possibilité de faire produire par un animal des anticorps doués de la propriété de combinaison spécifique vis-à-vis de divers groupes chimiques de structure connue. Des 1917 il prépara, avec ses collaborateurs, des antigènes artificiellement conjugués, en copulant des composés chimiques relativement simples avec des protéines. Il injectait ensuite à des animaux ces antigènes artificiels (généralement des azoprotéines de structure protéine—N=N—R, obtenues par copulation d'une amine diazotée et de la molécule protéique). Landsteiner produisait ainsi des antisérums dans lesquels on trouve des

anticorps doués du pouvoir de se combiner avec la protéine employée pour la préparation de l'azoprotéine, ainsi que des anticorps ayant la propriété spécifique de se combiner avec le groupe copulé, de structure connue, qu'il appelle groupe haptènique. La méthode la plus pratique pour l'étude du pouvoir de combinaison entre anticorps et antigènes homologues est la méthode de précipitation — un antisérum mélangé en proportion convenable avec une solution de l'antigène correspondant donne lieu à un précipité tandis que, d'une façon générale, il ne peut former de précipité avec d'autres substances. Par exemple, Landsteiner a préparé une azoprotéine par diazotation de l'acide *p*-aminobenzoïque



et copulation avec l'albumine de l'œuf pour obtenir l'azoprotéine



qui contient plusieurs groupes hapténiques attachés à chaque molécule de protéine. Il découvrit que l'antisérum obtenu en injectant cette azoprotéine à un lapin n'avait pas seulement la propriété de former un précipité avec une solution de l'azoprotéine originale, obtenue à partir d'albumine d'œuf, mais pouvait encore former un précipité avec une solution d'une azoprotéine obtenue à partir de n'importe quelle protéine, telle l'albumine du sérum bovin, copulée avec de l'acide *p*-aminobenzoïque diazoté. Cette propriété de former un précipité avec n'importe quelle azoprotéine contenant le groupe ionique *p*-aminobenzoate montre que l'anticorps a acquis le pouvoir de se combiner avec ce groupe haptènique. La propriété de combinaison est, de plus, fortement (mais pas complètement) spécifique. L'antisérum ne précipite pas avec une azoprotéine formée par copulation avec une protéine d'une substance sans rapport, comme par exemple, l'acide *p*-aminosuccinanilique diazoté, mais il peut former un léger précipité avec des azoprotéines obtenues à partir de substances voisines, telles qu'un acide *p*-aminobenzoïque substitué, avec un groupe ou un atome tels qu'un méthyle ou un chlore fixés à l'anneau benzénique.

La description suivante du processus de formation des anticorps sous l'influence d'une molécule d'antigène fut imaginée au cours de tentatives faites pour concevoir la structure la plus simple possible pour des molécules douées des propriétés observées pour les anticorps, en se basant sur les renseignements disponibles relatifs aux forces intramoléculaires et intermoléculaires, et aussi pour imaginer le processus vraisemblable le plus simple de formation de ces molécules [2]. Cette théorie de la structure et du processus de formation des anticorps est basée sur les concepts que les forces entre les anticorps et les antigènes correspondants sont les mêmes que les forces à portée courte existant entre les molécules plus simples et aussi, que la spécificité très marquée résulte d'un « complémentarisme » de configuration très poussé, s'étendant sur une surface considérable de la molécule d'antigène et sur la partie correspondante qui entre en combinaison dans la molécule de l'anticorps. Ce concept de la spécificité des réactions sérologiques résultant du complémentarisme de structure fut d'abord suggéré par Breinl et Haurowitz [3] et présenté indépendamment par Jerome Alexander [4] et Stuart Mudd [5]. On le trouve également indiqué dans les premiers travaux d'Ehrlich (théorie de la serrure et de la clef) et de Bordet. Le concept de la multivalence des molécules d'anticorps et d'antigènes qui est maintenant incorporé à cette théorie est dû à J. R. Marrack [6] et est supporté par les travaux de Michael Heidelberger. De nombreuses recherches expérimentales effectuées à Pasadena depuis 1940 ont fourni des résultats favorables au concept de complémentarisme et également à celui de la multivalence des anticorps.

Décrivons maintenant le précurseur immédiat d'une molécule de γ-globuline normale comme une chaîne polypeptidique contenant mille résidus amino-acides ou même davantage, disposés en succession déterminée par la nature du système d'enzymes et les structures réticulaires constituant la cellule dans laquelle a lieu la synthèse de la γ-globuline. Nous supposons que cette chaîne polypeptidique peut devenir une molécule de γ-globuline normale ou une molécule d'anticorps à propriété de combinaison spécifique vis-à-vis d'un antigène arbitraire, suivant la façon dont la chaîne polypeptidique longue et complexe est plissée. Il semble probable que quelques protéines naturelles présentent une succession de résidus amino-acides telle que parmi tous les modes possibles dont cette chaîne pourrait être plissée, l'un d'eux soit particulièrement stable. Nous supposons cependant que la chaîne polypeptidique de γ-globuline peut présenter un grand nombre de modes différents de pelotonnage offrant des stabilités à peu près égales. Lorsque la synthèse de la chaîne polypeptidique a lieu dans la cellule en l'absence de toute molécule étrangère, elle tend à se pelotonner suivant la forme la plus stable dans les conditions normales

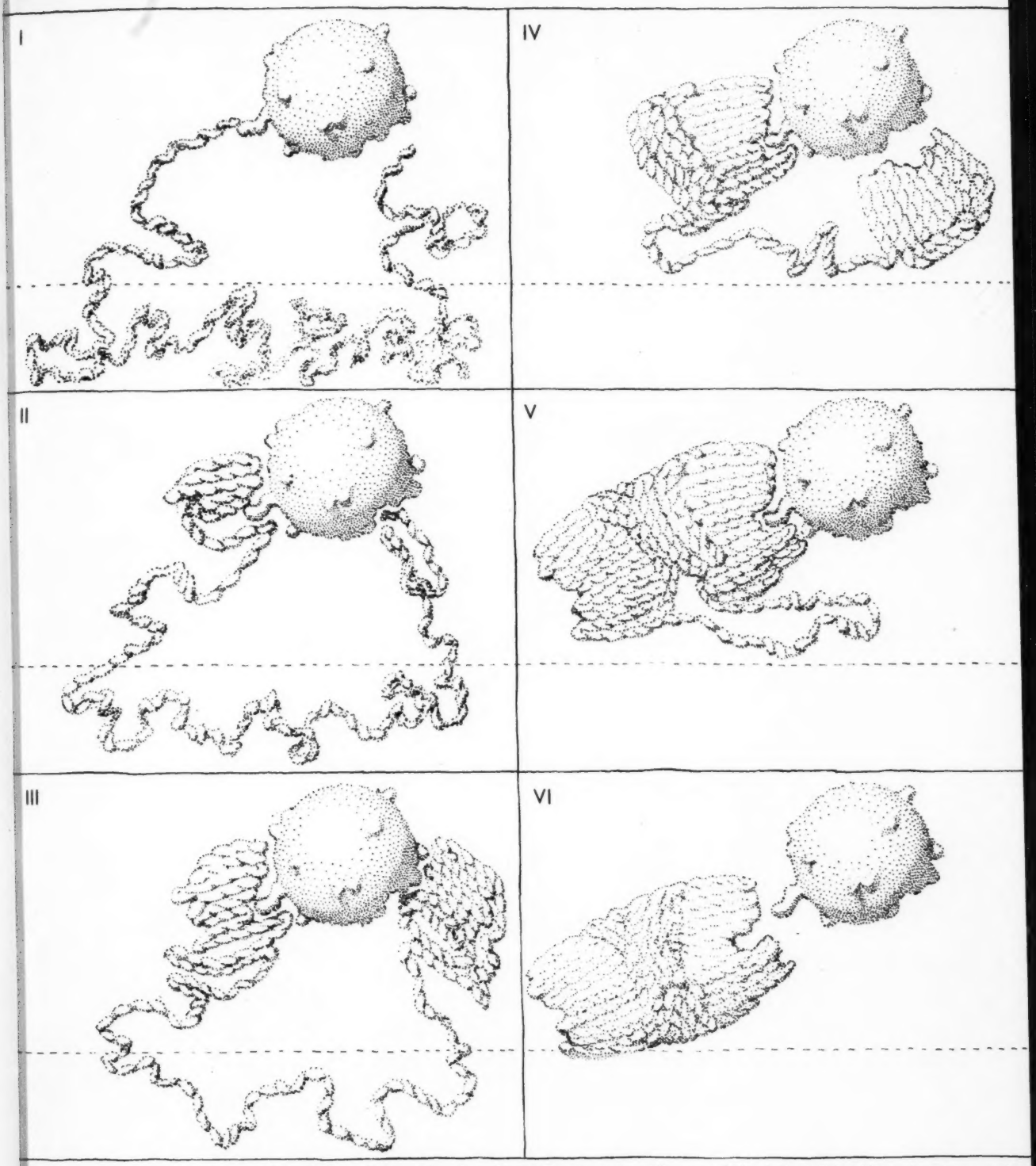


FIGURE 1. – *Processus hypothétique de formation de molécule d'anticorps par plissement de la chaîne polypeptidique du précurseur de l'anticorps en présence d'une molécule d'antigène, de façon à assumer des configurations complémentaires de celle de l'antigène.*

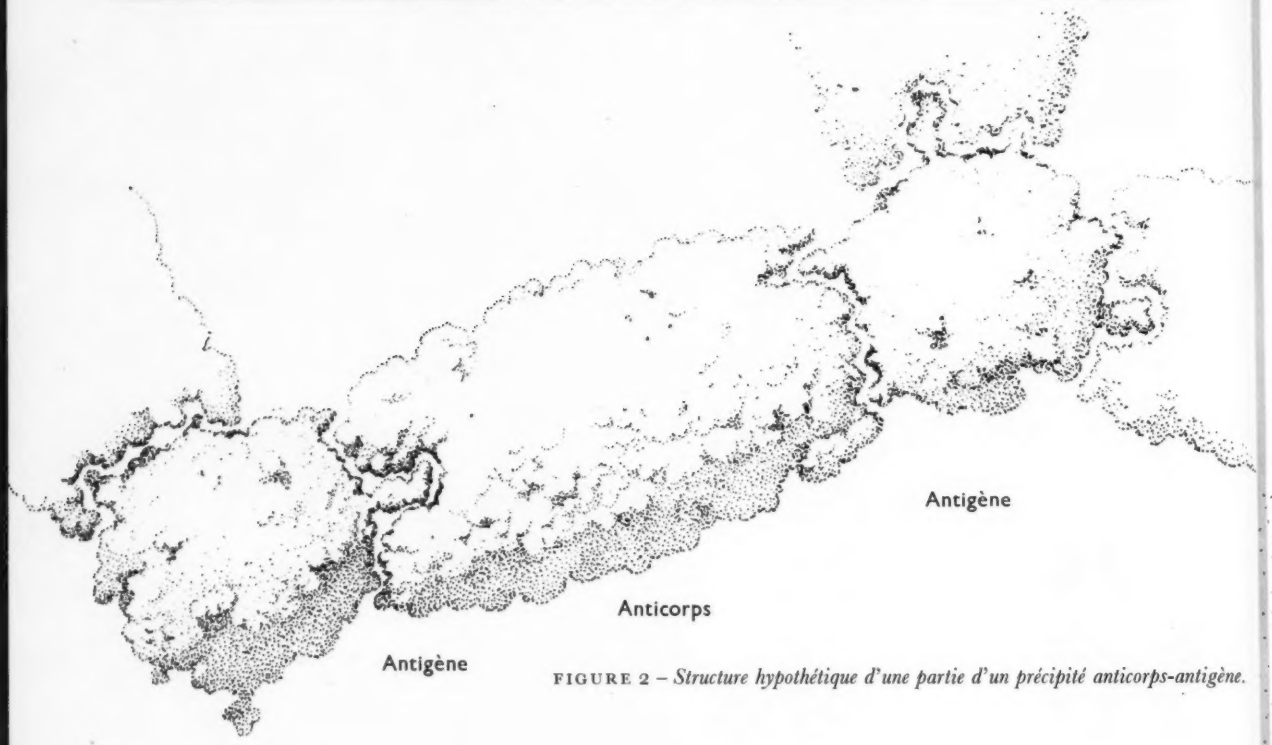


FIGURE 2 – *Structure hypothétique d'une partie d'un précipité anticorps-antigène.*

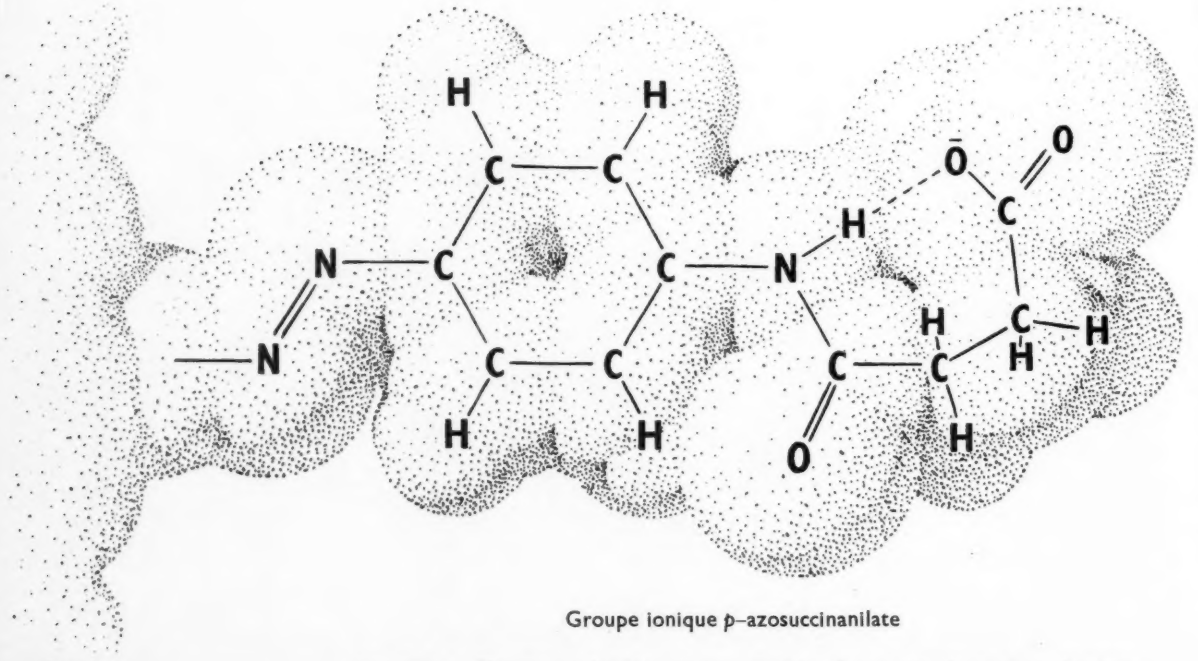


FIGURE 3 – *Structure de l'haptène d'une azoprotéine, l'ion ovalbumine-*p*-azosuccinanilate.*

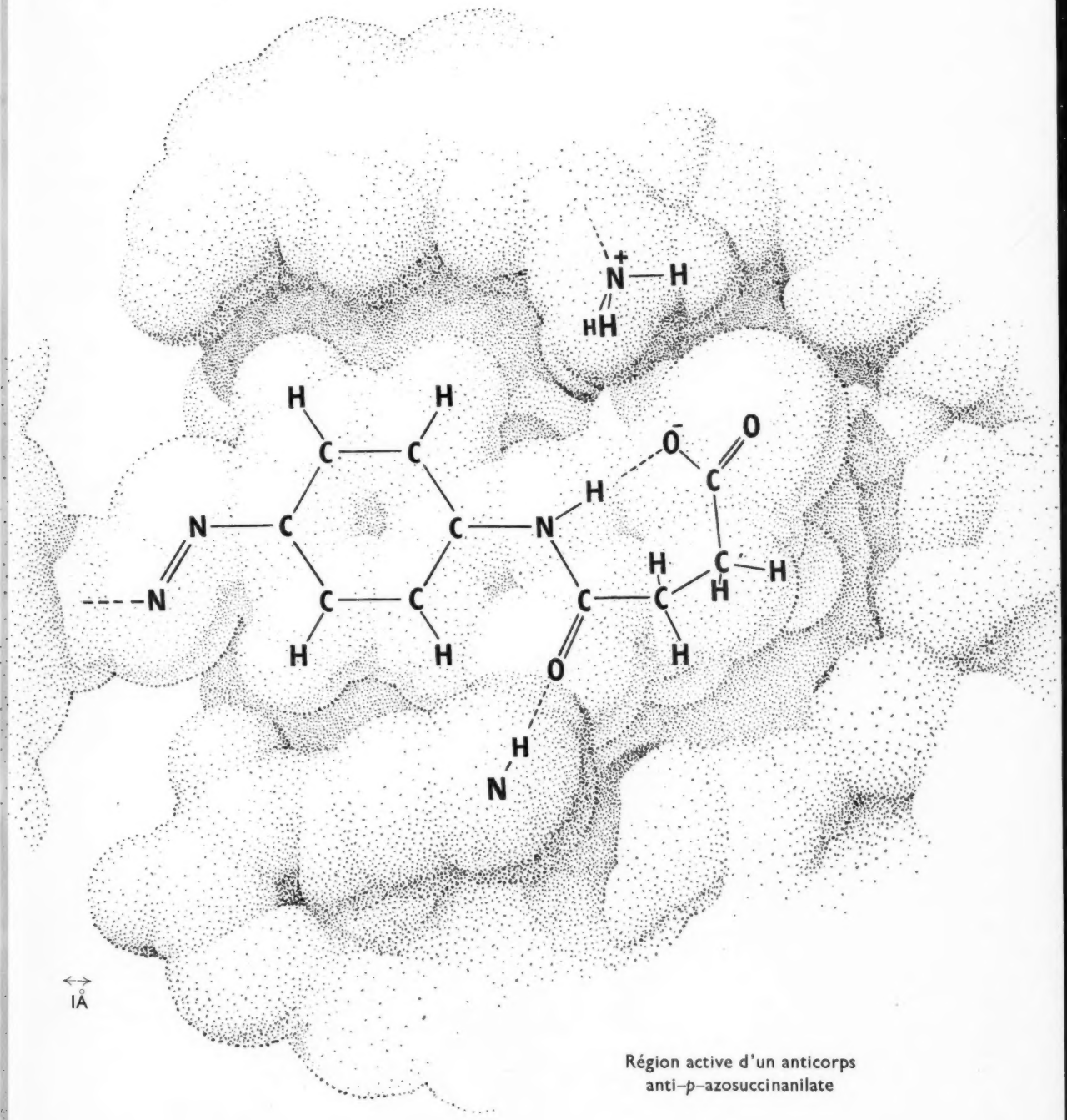


FIGURE 4 – *Groupe hapténique et région complémentaire de son anticorps spécifique.*

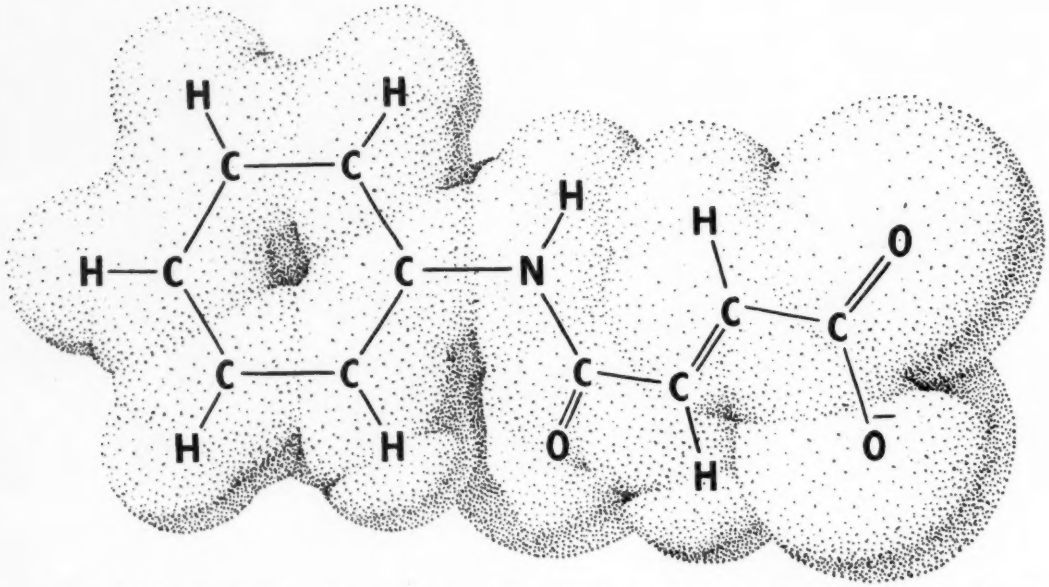


FIGURE 5 – *L'ion fumaranilate qui présente un pouvoir de combinaison très faible vis-à-vis de l'anticorps de la figure* 4.

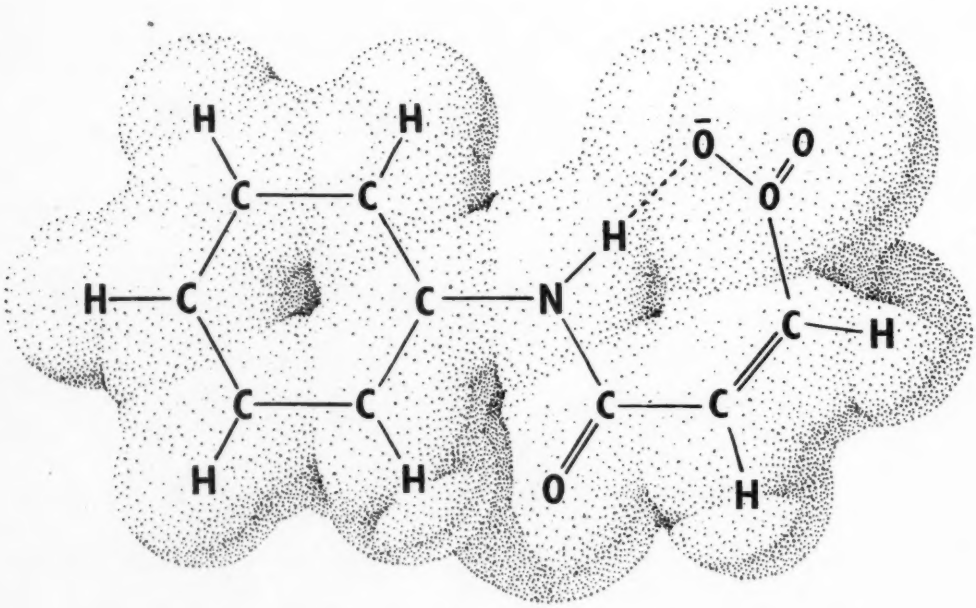


FIGURE 6 – *L'ion maléanilate, qui se combine fortement avec l'anticorps de la figure* 4.

au sein de la cellule et produit ainsi une molécule de γ-globuline normale. Si, cependant, il y a dans la cellule une molécule d'antigène, le milieu dans lequel se trouve la chaîne polypeptidique de γ-globuline est différent, et cette différence de milieu aura pour effet la stabilisation d'autres formes possibles de la chaîne polypeptidique, en particulier de celles qui ont le pouvoir d'attraction le plus marqué vis-à-vis de la molécule d'antigène. Ce processus hypothétique fournit une méthode automatique de production d'une molécule dont la structure sera complémentaire d'une portion de la surface de la molécule d'antigène.

Dans la figure 1, la molécule d'antigène est représentée comme un agrégat d'atomes, à peu près sphérique, dont la structure superficielle est indiquée par des protubérances et des creux. L'une de ces protubérances peut, par exemple, représenter un groupe hapténique constitué par un ion *p*-azobenzoate. On représente la synthèse du précurseur de la γ-globuline ayant lieu dans une partie de la cellule distincte de celle occupée par l'antigène (cette région étant indiquée par une ligne de traits). Dans la première section de la figure 1 on voit deux extrémités d'une chaîne polypeptidique libérées d'abord de cette région et se plissant suivant la configuration la plus stable qu'elles puissent assumer. Dans la seconde section de la figure on voit ces deux extrémités de chaînes polypeptidiques attirées à la surface de l'antigène et assumant des configurations telles que les forces d'attraction existant entre elles et la molécule d'antigène soient aussi grandes que possible. Etant donné que la plupart des forces actives entre les molécules décroissent très rapidement avec des distances croissantes et ne sont considérables que pour une région de quelques unités Ångström, les formes stabilisées de l'extrémité de la chaîne seront celles qui amènent la plus grande portion possible de chacune d'elles en juxtaposition immédiate avec la surface de la molécule d'antigène, c'est-à-dire que la structure des régions entrant en combinaison auront le plus grand complémentarisme possible avec la structure superficielle de la molécule d'antigène. Ce complémentarisme comporte non seulement une similarité de configuration superficielle, mais encore la juxtaposition de certains groupes réagissants, tel qu'un groupe chargé négativement dans l'anticorps avec un groupe chargé positivement dans l'antigène et un groupe formant une liaison hydrogénée portant le proton, avec un groupe similaire présentant une paire d'électrons.

La troisième section de la figure 1 montre l'antigène et deux régions actives de l'anticorps formée. La partie centrale de la chaîne polypeptidique n'a pas encore été plissée. Le quatrième schéma représente l'une des régions actives de l'anticorps se détachant de l'antigène sous l'influence de l'agitation thermique; la partie centrale de la chaîne polypeptidique se replie alors suivant sa configuration stable, réunissant ainsi les deux régions actives de l'anticorps dans sa molécule finale. On voit dans le cinquième schéma cette molécule encore attachée à l'antigène par l'un des groupes réagissants; dans le sixième schéma on voit la molécule finale d'anticorps se dissociant de l'antigène sous l'influence de l'agitation thermique, formant un anticorps libre qui entrera dans la constitution du taux en anticorps du plasma sanguin.

L'hypothèse suivant laquelle la plupart des molécules d'anticorps présenteraient deux régions susceptibles de se combiner avec l'antigène (c'est-à-dire qu'elles seraient bivalentes) explique certaines propriétés des antisérums. Par exemple, certains anticorps correspondant aux antigènes cellulaires, tels les globules rouges du sang, peuvent provoquer l'agglutination de ces cellules. Le sérum humain des types sanguins B ou O contient des anticorps capables de se combiner avec l'antigène A qui se trouve sur les globules rouges du sang humain des types A ou AB. Lorsqu'on ajoute ce sérum à une suspension de globules rouges, ceux-ci s'agglutinent. L'explication la plus simple de ce phénomène est que la molécule d'anticorps emploie l'un de ses groupes actifs pour s'attacher à la surface extérieure d'un globule rouge en se combinant avec le groupe hapténique A présent sur cette paroi cellulaire, puis, entrant en collision avec un autre globule rouge, la deuxième région active forme une liaison avec cette nouvelle cellule, les réunissant de ce fait. Ce processus peut continuer jusqu'à ce que tous les globules soient agglutinés en caillots. Une explication identique permet de comprendre instantanément le phénomène de précipitation sérologique, comme l'a montré Marrack. La molécule d'antigène peut utiliser diverses portions de sa surface pour s'attacher à plusieurs molécules d'anticorps, comme l'indique la figure 2, et chaque molécule d'anticorps peut alors employer son second groupe actif pour se lier à d'autres molécules d'antigène. A mesure que ce processus se poursuit, les agrégats de molécules d'antigène et d'anticorps deviennent de plus en plus volumineux et finissent par constituer un précipité visible. Les antisérums ne présentent pas tous le pouvoir de précipitation

sérologique; ces antisérums dépourvus d'action précipitante contiennent probablement des anticorps monovalents, à un seul groupe actif.

Landsteiner découvrit une méthode particulièrement intéressante pour l'étude du degré de spécificité des anticorps. Il trouva que lorsqu'on ajoutait de l'acide benzoïque à un sérum anti-*p*-aminobenzoïque il ne se formait pas de précipité. Toutefois une réaction avait eu lieu entre les ions benzoate et l'antisérum, mise en évidence par le fait que si l'on ajoutait à la solution de l'azoprotéine correspondante elle ne précipitait pas avec l'antisérum, ce qu'elle aurait fait en l'absence d'ion benzoate. Landsteiner explique cette action inhibitrice de l'ion haptènique benzoate comme résultant de la formation d'un complexe soluble entre l'anticorps et l'ion benzoate. Une explication du phénomène est immédiatement fournie par la théorie « réticulaire » de précipitation sérologique et par l'hypothèse de la bivalence des anticorps: l'anticorps bivalent est capable de se combiner avec deux molécules d'ion benzoate, chacune d'elles se fixant à l'un de ses groupes actifs, mais il ne peut former avec cet ion de précipitation réticulaire parce que l'ion benzoate (« antigène ») lui-même ne peut se combiner qu'avec une seule molécule d'anticorps. L'antigène azoprotéine avec ses plusieurs groupes haptèniques *p*-azobenzoate, peut former un précipité en l'absence d'ion benzoate, mais, en sa présence, tout l'anticorps se trouve lié avec cet ion sous forme de complexes solubles et, de ce fait, ne peut précipiter.

Poursuivant les travaux de Landsteiner, le professeur Dan H. Campbell, le docteur David Pressman et moi-même, en collaboration avec quelques élèves, avons effectué des recherches quantitatives sur le pouvoir inhibiteur relatif d'un grand nombre d'haptènes et nous avons obtenu ainsi des renseignements détaillés sur l'étroite adaptation qui existe entre la région active de l'anticorps et les groupes haptèniques de structure connue. On a trouvé que, d'une façon générale, le remplacement d'un groupe par un autre dont la forme ne diffère de la première que par une ou deux unités Ångström amène une diminution sensible du pouvoir de combinaison avec l'anticorps. Par exemple, l'introduction d'un groupe méthyle à la place d'un atome d'hydrogène en position *méta* dans le noyau benzénique de l'ion benzoate, réduit le pouvoir de combinaison d'un sérum anti-*p*-amino-benzoïque au dixième environ de sa valeur originale. Cette diminution du pouvoir de combinaison s'explique comme résultant d'une résistance à l'adaptation du groupe méthyle plus gros, dont le rayon effectif est d'environ 2,0 Å. Il a été démontré également qu'il y a dans l'anticorps un groupe chargé négativement qui se trouve presque à la distance d'approche minimum d'un groupe chargé positivement dans le groupe haptènique d'une azoprotéine employée pour préparer l'antisérum [7].

Les figures 3 à 6 montrent le degré d'influence de la forme moléculaire sur le pouvoir de combinaison avec un anticorps. La figure 3 représente le groupe ionique *p*-azosuccinanilate présent en même temps que plusieurs autres groupes similaires dans une molécule d'azoprotéine employée pour la production, par injection à des lapins, d'un antisérum anti-*p*-azosuccinanilate. On montre sur la figure 4, à l'aide d'un schéma, les régions actives d'un tel antisérum entourant le groupe haptènique, le degré de rapprochement étant indiqué comme environ 1 Å. Il semble probable qu'en pratique il y ait dans bien des cas un rapprochement encore plus grand entre les atomes superficiels de l'anticorps et l'antigène et que l'anticorps présente suffisamment d'élasticité pour permettre l'introduction d'haptènes dont la forme ne diffère que de 1 ou 2 Å, en dimensions linéaires, de celles du groupe haptènique de l'antigène immunisant. On voit sur la figure un groupe ionique ammonium, chargé positivement, à la distance d'approche minimum du groupe carboxyle, chargé négativement, de l'haptène succinanilate, et un groupe $>NH$, capable de former une liaison hydrogénée avec le groupe carbonyle du succinanilate, est figuré dans la position correcte pour que cette liaison hydrogénée soit formée.

L'ion maléanilate:

$$C_6H_5.NH.CO.CH{=}CH.COO^-$$

et l'ion fumaranilate (de même formule) sont des substances très voisines, différant seulement par leur configuration spatiale, l'ion maléanilate ayant la forme *cis* autour de la double liaison carbonée, et l'ion fumaranilate, la forme *trans* autour de cette double liaison. On a vu que ces ions diffèrent fortement dans leur activité inhibitrice vis-à-vis du sérum anti-*p*-azosuccinanilate. L'ion maléanilate présente un pouvoir inhibiteur presque aussi grand que celui de l'ion haptènique succinanilate correspondant lui-même, tandis que l'ion fumaranilate n'a qu'une action très faible, environ 1% seulement de celle de l'ion maléanilate. Cette propriété des anticorps de distinguer entre les ions de substances de structures si

voisines avait été découverte par Landsteiner, et elle a été vérifiée au moyen de l'étude de l'inhibition des haptènes par des centaines de substances. Les schémas des figures 5 et 6 montrent la différence de structure relativement minime qui existe entre les ions fumaranilate et maléanilate.

L'importance de la charge positive dans l'anticorps est mise en évidence par le fait qu'aucun haptène, excepté ceux qui ont un groupe à charge négative — soit un groupe ionique carboxyle ou un groupe ionique très voisin — n'ont la propriété de se combiner avec des anticorps homologues de l'ion *p*-azosuccinanilate. La présence dans la molécule de l'anticorps d'un groupe capable de former une liaison hydrogénée en se combinant avec le groupe carbonyle, est vérifiée par le fait que seuls les haptènes contenant ce groupe carbonyle présentent de façon notable le pouvoir de se combiner avec l'anticorps.

Il est intéressant de voir que l'étude des réactions sérologiques peut être employée pour élucider la structure moléculaire et la configuration de substances simples [8]. On pourrait ainsi croire que le groupe ionique *p*-azosuccinanilate, indiqué sur la figure 3, a une configuration allongée, du même genre que celle de l'ion fumaranilate, du fait qu'il existe une liberté de rotation considérable autour de la liaison carbone-carbone. On peut cependant déduire du fait que l'ion maléanilate présente un pouvoir de combinaison très marqué avec les anticorps anti-*p*-azosuccinanilate, tandis que celui de l'ion fumaranilate est faible, que ces anticorps ont une configuration complémentaire de celle de l'ion maléanilate et que, en conséquence, le groupe ionique *p*-azosuccinanilate, qui sert de « gabarit » pour l'élaboration de ces anticorps, présente lui-même une configuration très voisine de celle de l'ion maléanilate. Cette structure, que l'on voit sur la figure 3, est probablement stabilisée en ce qui concerne la forme *trans*, par la formation d'une liaison hydrogénée N—H . . . O entre un groupe imino et un oxygène du groupe carbonyle. Le fait que l'ion succinanilate lui-même, ainsi que d'autres amides de l'acide succinique et les monoalcoyle-esters succiniques, se combinent aussi fortement avec les antisérums, montre que ces ions tendent à assumer une configuration *cis* identique. Cependant, l'ion succinate ($^{-}OOC.CH_2.CH_2.COO^{-}$) a un pouvoir de combinaison étonnamment faible vis-à-vis de l'antisérum — approximativement égal à celui de l'ion fumarate et très inférieur à celui de l'ion maléate — d'où l'on peut supposer que l'ion succinate a essentiellement une configuration *trans* autour de la liaison simple carbone–carbone. Une raison évidente de la stabilité de la forme *trans* pour cet ion est la répulsion électrique existant entre les deux groupes carboxyles chargés négativement.

On a décrit dans un paragraphe précédent un mécanisme assez compliqué d'élaboration d'anticorps à deux groupes actifs. L'existence de ces anticorps bivalents est probablement expliquée par le rôle utile qu'ils jouent en provoquant l'agglutination des cellules et la précipitation des molécules d'antigène. Cependant, personnellement, j'ignore en quoi ces phénomènes sont utiles aux animaux et de quelle manière ils constituent une protection supplémentaire contre la maladie.

Néanmoins, l'agglutination et la précipitation sérologiques sont des phénomènes remarquables et il est intéressant de voir s'il est possible de les expliquer de façon satisfaisante à l'aide des mêmes forces que celles qui produisent les combinaisons spécifiques anticorps et antigène ou s'il est nécessaire d'ajouter une autre explication. En suggérant que la première de ces alternatives était correcte et que l'agglutination et la précipitation résultent de la multivalence de l'anticorps, Marrack [6] invoquait à l'appui de son hypothèse diverses observations expérimentales. Les travaux de Heidelberger et Kendall [9] apportèrent un nouvel appui à la théorie réticulaire.

Une expérience frappante effectuée récemment laisse peu de doutes sur l'exactitude de la théorie pour la précipitation sérologique et l'agglutination [10]. Landsteiner et van der Scheer [11] avaient observé que certaines substances simples contenant deux groupes hapténiques pouvaient former un précipité avec les antisérums correspondant aux haptènes. Il nous parut possible que la formation d'un précipité avec ces substances contenant deux groupes d'haptènes et l'absence de précipité avec des substances n'en contenant qu'un et dont le pouvoir inhibiteur est, en général, dû à la formation de complexes solubles, pourraient être expliquées directement par la théorie réticulaire et que l'on pourrait, de ce fait, vérifier la théorie en étudiant un grand nombre de substances mono et polyhapténiques. On employa pour ces expériences des antisérums correspondant au groupe ionique *p*-azobenzène arsonate [12]. On constata que, parmi les substances essayées, celles qui contiennent dans leur molécule deux ou plusieurs groupes ioniques *p*-azobenzène arsonate donnent un précipité avec les antisérums, et l'on compte une vingtaine de ces substances, tandis que trente substances

essayées qui ne contenaient qu'un groupe ionique benzène-arsonate dans leur molécule, ne formaient pas de précipité et empêchaient même sa formation avec un antigène de précipitation.

On pourrait cependant discuter et dire que la tendance des molécules polyhapténiques à former des précipités avec les antisérums est due à une autre propriété que celle d'être polyhaptènique et qu'il est possible qu'un seul groupe d'haptène entre en combinaison avec l'anticorps. Une expérience spéciale fut effectuée [10] dont les résultats montrèrent que, dans la formation du précipité sérologique, chacun des deux groupes hapténiques d'une substance dihaptènique entre en combinaison spécifique avec l'anticorps.

On a observé que l'on pouvait obtenir des antisérums par injection à deux lapins et que l'on pouvait préparer synthétiquement une substance telle qu'elle ne précipitait avec aucun de ces deux antisérums, mais par contre, précipitait avec un mélange des deux. La réaction sérologique est donc, dans ce cas, une réaction entre une substance de structure connue qui sert d'antigène de précipitation, et deux antisérums différents qui doivent co-opérer pour la production d'un précipité avec la substance.

On injectait à l'un des lapins une azoprotéine contenant des groupes R (groupes ioniques *p*-azobenzène arsonate), et à l'autre une protéine contenant des groupes X (groupes ioniques *p*-azobenzoate). Les antisérums sont donc un sérum anti-R et un sérum anti-X. Chacun d'eux est capable de former un précipité avec des substances contenant deux ou plusieurs groupes hapténiques correspondants. Les deux substances RX employées dans l'expérience avaient été obtenues par copulation d'un groupe R et d'un groupe X avec une molécule de structure connue. L'une de ces substances était le 1-amino-2-*p*-(*p*-azobenzèneazo)-benzènearsonique-3,6-disulfonique-7-*p*-(*p*-azobenzèneazo)-benzoïque-8-hydroxynaphtalène, et l'autre, le 1,8-dihydroxy-2-*p*-azobenzènearsonique-3,6-disulfonique-7-*p*-(*p*-azobenzèneazo)-benzoïque-naphtalène. On peut observer pour chacune de ces substances qu'elles ne donnent pas de précipité (ou ne donnent qu'un précipité très léger) avec les sérums anti-X et anti-R séparément, mais qu'elles forment un précipité abondant avec un mélange des deux. Cette observation prouve fortement que la précipitation de l'anticorps et de l'antigène implique les deux groupes hapténiques de l'antigène dihaptènique. Lorsqu'une substance RX est mélangée à du sérum anti-R seul, elle emploie ses groupes R en combinaison avec les anticorps anti-R, deux molécules de RX formant ainsi un complexe soluble avec une molécule d'anticorps bivalent; et parce que les molécules RX sont en fait monohapténiques lorsque les anticorps anti-R seuls sont présents, il ne peut se former de précipité réticulaire. Toutefois, en présence d'un mélange d'anticorps anti-R et anti-X, la molécule est effectivement bivalente et peut former un précipité dans lequel alternent les anticorps anti-R et anti-X.

Il y a maintenant des preuves très convaincantes que la spécificité du pouvoir de combinaison des anticorps peut s'expliquer au moyen de forces à action réduite, de nature connue, la spécificité elle-même résultant d'un complémentarisme de structure de la région active de l'anticorps et de la surface de l'antigène correspondant; il n'y a pas lieu d'invoquer des forces biologiques spéciales, de nature inconnue, pour expliquer les phénomènes sérologiques. Il ne semble pas impossible que la spécificité biologique en général puisse être expliquée de façon similaire, comme résultant des forces à portée réduite ordinaires, non spécifiques, agissant entre toutes les molécules, la spécificité des forces dans les systèmes biologiques étant due à la configuration superficielle complexe des grosses molécules qui s'y trouvent. Cependant on a moins de renseignements sur la nature des forces biologiques dans les systèmes autres que les systèmes sérologiques. Les phénomènes tels que la compétition entre les sulfamides et l'acide *p*-aminobenzoïque et, d'une façon générale, l'inhibition des systèmes enzymatiques par des substances de structure voisine de celles qui prennent part à la réaction catalytique, suggèrent par leur similarité avec l'inhibition des précipitations sérologiques par les haptènes que les mêmes forces entrent en jeu dans les deux cas. Par exemple, l'ion malonate inhibe l'activité catalytique de la déhydrosuccinase, probablement parce qu'il entre en compétition avec l'ion succinate pour se fixer sur la partie active de l'enzyme. Le fait que l'ion malonate soit particulièrement actif comme inhibiteur de ce catalyseur peut être très important du point de vue mécanisme de l'activité catalytique. Si la région catalytiquement active de l'enzyme était de structure parfaitement complémentaire de celle de l'ion succinate, il n'y aurait probablement pas accélération de la réaction de déshydrogénation de l'ion succinate, mais, au contraire, elle serait retardée puisque, en entrant en combinaison, l'ion se trouverait stabilisé, augmentant ainsi la quantité

d'énergie nécessaire à la conversion de l'ion en complexe activé pour la réaction de déshydrogénation. Si, cependant, l'enzyme avait une structure plus exactement complémentaire de celle du complexe activé lui-même que de celle de l'ion succinate, ceci entraînerait une diminution de l'énergie d'activation pour la réaction et, de cette façon, l'accélèrerait. L'efficacité inhibitrice de l'ion malonate fait penser que cet ion a une structure plus voisine de celle du complexe activé de la réaction de déshydrogénation de l'ion succinate que l'ion lui-même et que c'est pour cette raison que l'ion malonate peut lutter efficacement avec lui pour occuper la position sur la région active de l'enzyme.

Il semble peu probable que les différences spécifiques entre les enzymes voisines produites par des animaux de différentes espèces, ou entre d'autres protéines comme l'hémoglobine, soient dues à une différence de structure aussi simple qu'une différence de pelotonnage des chaînes polypeptidiques. Il est probable que les anticorps sont uniques dans l'emploi de ce seul mécanisme pour la production de leur différence spécifique et que les autres macromolécules biologiques dépendent de changements structuraux plus profonds pour produire ces différences de propriétés spécifiques. En particulier, je crois vraisemblable qu'une mutation soit due, en général, non pas simplement à un pelotonnage différent de la partie en filament de la structure de la nucléoprotéine qui constitue le gène, mais plutôt à une modification dans la composition de cette partie qui ait le pouvoir d'affecter son activité catalytique de façon à lui permettre l'élaboration contrôlée de répliques de lui-même possédant la structure modifiée. Il semble possible qu'un gène puisse être abîmé par la lumière ultraviolette, par les rayons X, ou par toute autre cause accidentelle, de telle sorte qu'il produise finalement une espèce mutante sans être lui-même un gène muté. L'avarie peut être si grave qu'il ne puisse remplir une fonction essentielle dans le développement de l'organisme; elle sera mortelle dans ce cas. Ou bien encore, elle peut être telle que le gène puisse quand même servir de « gabarit » et exercer les autres fonctions et produire des répliques de lui-même tel qu'il était avant d'être endommagé. C'est ainsi que Stanley a trouvé que des molécules de virus de la mosaïque du tabac qu'il avait traités chimiquement pour modifier la nature de nombreux groupes avaient encore le pouvoir d'infecter la plante, mais que les générations successives de ces molécules de virus modifiées étaient identiques aux molécules du virus original. Il pourrait encore arriver que le gène endommagé puisse remplir ses fonctions et produire de nouveaux gènes à structure légèrement modifiée qui pourraient eux-mêmes servir de « gabarit » jusqu'à ce que, finalement, soit atteint un état stable pour lequel il n'y aurait pas de différence entre le gène servant de gabarit et le gène produit. Ceci serait le phénomène de mutation.

On a jusqu'à présent peu d'évidences certaines de la nature intime du processus d'élaboration de répliques de molécules biologiques complexes, telles que les virus ou les gènes, mais il est clair que le phénomène de production de structures complémentaires, comme dans la formation d'anticorps, constitue un mécanisme possible. L'élaboration de la réplique d'un gène, par exemple, peut exiger la production d'un intermédiaire, le gène produisant une molécule de structure complémentaire à la sienne qui servira, à son tour, de gabarit pour la reproduction d'un double du gène original. Cette hypothèse est corroborée par l'existence dans les organismes vivants de structures complémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

[1] LANDSTEINER, K. *The Specificity of Serological Reactions* (Charles C. Thomas, Springfield, Ill., 1936).

[2] PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.*, **62**, 2643 (1940).

[3] BREINL, S., et HAUROWITZ, F. *Zeit. physiol. Chem.*, **192**, 45 (1930).

[4] ALEXANDER, J. *J. Protoplasma*, **14**, 296 (1931).

[5] MUDD, STUART. *J. Immunol.*, **23**, 423 (1932).

[6] MARRACK, J. R. « The Chemistry of Antigens and Antibodies », Rapport No. 230 du Medical Research Council (2e édition, 1938) (H.M. Stationery Office, Londres, 1934).

[7] PRESSMAN, D., GROSSBERG, A. L., PENCE, L. H., et PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.*, **68**, 250 (1946).

[8] PRESSMAN, D., BRYDEN, J., et PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.* (paraîtra prochainement).

[9] HEIDELBERGER, M., et KENDALL, F. E. *J. Exp. Med.*, **61**, 559, 563; **62**, 467, 697 (1935).

[10] PAULING, L., PRESSMAN, D., et CAMPBELL, D. H. *J. Am. Chem. Soc.*, **66**, 330 (1944).

[11] LANDSTEINER, K., et VAN DER SCHEER, J. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **29**, 747 (1932).

[12] PAULING, L., PRESSMAN, D., CAMPBELL, D. H., et collaborateurs. *J. Am. Chem. Soc.*, **64**, 2994, 3015 (1942); **65**, 728 (1943).

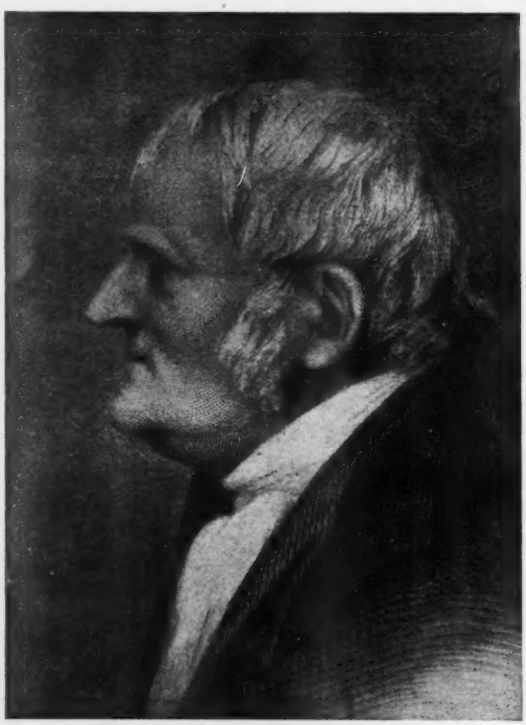
[13] TYLER, A. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **25**, 317 (1939); **26**, 249 (1940); *Growth*, **10** (supplément), 7 (1947).

John Dalton

J. R. PARTINGTON

Depuis le temps d'Empédocle, les philosophes ont discuté l'idée que la matière se compose d'atomes. Le mérite scientifique particulier de John Dalton est dû à ce qu'il a formulé de façon précise une théorie atomique, et qu'il l'a appliquée aux problèmes chimiques. Sa théorie lui permit d'expliquer d'un seul coup toutes les lois de la combinaison chimique connues à son époque, et, bien qu'elle ait été modifiée et étendue, le fait que toute la chimie repose encore sur elle est un hommage à son génie. Le professeur Partington suggère que c'est l'étude de la constitution de l'atmosphère qui amena Dalton à faire ses découvertes.

John Dalton naquit à Eaglesfield, un village dans le Cumberland, à l'écart des principaux centres commerciaux et intellectuels. Ses parents et ses ancêtres étaient des artisans et non des paysans, et, bien qu'ils n'eussent que des moyens modestes, ils possédaient un petit domaine. Ils appartenaient à la Société des Amis (Quakers). John Dalton en fit partie toute sa vie, c'est pourquoi il n'y a pas trace de sa naissance dans les registres paroissiaux, et la date (le 6 septembre 1766) a été retrouvée beaucoup plus tard dans les souvenirs des voisins de ses parents. Son père, qui tissait la laine, lui enseigna l'arithmétique; à 10 ans un riche Quaker ayant des connaissances scientifiques, Elihu Robinson, lui donna des leçons de mathématiques; il allait à l'école, où, à défaut d'être brillant, il passait pour zélé et persévérant. A 12 ans il organisa lui-même une école, mais il avait peine à contrôler des garçons plus grands et plus forts que lui. En 1781 son frère et lui s'engagèrent comme assistants dans une école à Kendal; en 1785 ils la reprirent à leur compte. Ils enseignaient le latin, le français et les mathématiques, ainsi que la grammaire anglaise: John avait appris les langues et les mathématiques au prix d'un dur travail, dans lequel il avait été encouragé et aidé par John Gough, un Quaker aveugle exceptionnellement doué. Pendant les hivers de 1787 et de 1791 Dalton donna des cycles de conférences de sciences naturelles, y compris la chimie, qu'il avait apprise dans les ouvrages de Boerhaave et de Boyle, et dans les *Essays* de l'évêque Watson, et il avait sans doute étudié avec Gough les *Principia* de Newton, lors de son séjour à Kendal. En 1793, sur la recommandation de Gough, il fut nommé répétiteur de mathématiques et de sciences naturelles à Manchester, au New College, une institution dissidente, et qui était l'aboutissement de l'Académie de Warrington. Il enseignait également la chimie, en se servant des *Eléments de Chimie* de Lavoisier. Dalton se fixa à Manchester pour le restant de son existence; lorsque le New College déménagea, il subvint à ses besoins en donnant des leçons particulières de grammaire, d'arithmétique et de science; Joule était un des ses élèves. Il publia en 1801, et de nouveau en 1803, les *Elements of English Grammar: or a New System of Grammatical Instruction.* En 1824 il fit des cours aux étudiants en médecine.



John Dalton, 1766–1844.

En 1794 Dalton annonça qu'il avait découvert

chez lui, en 1792, le défaut de vision qui porte son nom, et les conséquences du daltonisme ont donné lieu à certaines anecdotes amusantes. En 1794 il devint membre de la Manchester Literary and Philosophical Society; en 1808 il en était le vice-président, et enfin le président, de 1817 à 1844. Il présenta plus d'une centaine de communications à la Société, dans ces locaux où de nombreux souvenirs de Dalton avaient été préservés jusqu'au jour où le feu, résultat indirect des bombes incendiaires allemandes, les détruisit en 1940. Il jouit d'une bonne santé jusqu'aux dernières années avant sa mort, et il était un vigoureux alpiniste, dépassant aisément la plupart de ses compagnons. Il ne se maria jamais, disant qu'il n'en avait pas le temps, mais il aimait la société des femmes lettrées. Bien qu'il fût fort prisé comme conférencier, il était plutôt gauche, et avait la voix rauque et profonde. Il manquait de précision dans ses expériences; ses appareils, des encriers de deux sous, des bouts de tubes et le reste à l'avenant, sembleraient ridicules à beaucoup, mais il ne se laissait pas facilement égarer par ses résultats, et dans le domaine difficile de l'analyse des gaz il manifestait une rare habileté.

Avant de devenir célèbre, Dalton fit des conférences en 1803–4 à la Royal Institution à Londres, sur l'invitation de Davy, et de nouveau en 1809–10, et son brillant collègue lui donna quelques conseils dans l'art du conférencier. Son public était clairsemé lors de certaines conférences qu'il fit à Edimbourg, mais il reçut un accueil très chaleureux à Glasgow en 1807. Dalton devint membre de la Royal Society en 1822 et reçut la Royal Medal en 1826; en 1830 il fut élu au nombre des huit membres étrangers de l'Académie Française, en 1834 il devint Docteur en Droit Civil à l'Université d'Oxford, et en 1833 il reçut du Gouvernement britannique une pension civile qui fut élevée à 300 livres par an en 1836. Le 27 juillet 1844 il mourut d'une attaque, et on lui fit des obsèques publiques solennelles. En somme, de son vivant déjà, Dalton jouit d'honneurs considérables et de l'estime du monde scientifique tout entier.

Depuis sa jeunesse, Dalton tenait un journal météorologique dans lequel il consigna des notes quotidiennes jusqu'au matin de sa mort, et son dernier acte fut d'y inscrire: « un peu de pluie » et, en caractères plus faibles, « aujourd'hui », terminant ainsi sa vie sur une observation scientifique. Son livre, *Meteorological Observations and Essays*, publié en 1793 (une seconde édition parut en 1834), contenait en germe toutes ses découvertes ultérieures, qui semblent provenir de son étude de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Newton, dans les *Principia*, avait adopté l'idée que la pression de l'air était due à une répulsion des particules par une force inversément proportionnelle à leur distance. L'explication cinétique, donnée par Bernoulli en 1737, que la pression résultait du bombardement par des particules mobiles, n'avait pas été acceptée. La théorie atomique n'avait jamais été perdue de vue depuis que les Grecs de l'antiquité l'avaient énoncée, et Newton s'en était largement servi dans son *Optique*. Il paraît s'être douté que des atomes différents ont des masses différentes, et il a certainement supposé qu'ils avaient des formes et des tailles diverses; quant à dire s'ils étaient divisibles, il déclarait qu'on ne pourrait décider de la question que par l'expérience.

Lavoisier s'était servi de la conception des atomes, et, dans ses *Eléments de Chimie* (1789), il professait qu'un gaz est formé de petites particules, entre lesquelles se trouvent des particules (ou « molécules ») du fluide de la chaleur (le calorique) et que la répulsion entre ces particules les maintient à distance et donne lieu à la pression. Lavoisier avait démontré que l'atmosphère, en plus de la vapeur d'eau, contient deux gaz, l'oxygène et l'azote, alors que Newton supposait que l'air n'était fait que d'une sorte de particules. D'autres savants pensaient que l'atmosphère était un composé chimique, expliquant ainsi pourquoi sa composition était invariable, et pourquoi l'oxygène plus lourd ne se séparait pas de l'azote. L'état de la vapeur d'eau restait indéterminé. C'est l'étude prolongée et continue de la constitution de l'atmosphère qui amena Dalton à découvrir la théorie atomique.

En 1793, dans ses *Meteorological Observations and Essays*, il affirma que « l'air pur est un mélange intime de divers fluides élastiques ou gaz », et que « si nous acceptons l'opinion, qui me semble la plus probable, que l'eau évaporée n'est pas chimiquement combinée aux fluides aériens, mais qu'elle existe en tant que fluide parmi le reste », les phénomènes de la pluie et de la rosée s'expliquent aisément. Un article dans le *Nicholson's Journal* en 1801 sur « Une Nouvelle Théorie de la Constitution des Fluides Aériformes Mélangés et particulièrement de l'Atmosphère » fut complété par quatre communications qu'il présenta en 1801 à la Manchester Literary and Philosophical Society, et qui lui acquirent sa réputation en Europe; ils comportent notamment la « loi des mélanges des gaz », ou loi des pressions partielles,

sur laquelle, dit-il dans son *New System* (1808), il « tomba » en automne 1801. Cette loi, a dit Henry en 1804, revenait à supposer que dans un mélange de gaz, chaque gaz « est le vide pour tous les autres ». En s'enquérant comment cela pouvait concorder avec des particules de différents gaz qui se repoussent, Dalton semble être arrivé à la conclusion que les particules de gaz différents ont des poids différents. Il se servait beaucoup de diagrammes, dont certains sont reproduits dans son livre, montrant les « particules ultimes » de gaz, sous forme de petites sphères, entourées d'atmosphères de calorique. Dans ses cours aussi, il employait des blocs de bois cubiques, pour représenter les atomes, ou de boules de bois avec des trous pour les joindre à d'autres au moyen d'épingles.

Dans le cahier de Dalton, le premier article donnant une table des poids atomiques, date de son anniversaire, le 6 septembre 1803, les valeurs (hydrogène 1, oxygène 5,66, azote 4, carbone 4,5, etc.) sont surtout basées sur les analyses de Lavoisier. La première fois qu'il mentionna ce sujet fut à la fin d'une communication faite le 12 novembre 1802, devant la Philosophical Society, mais qui ne fut publiée qu'en 1805, au cours de laquelle il décrivit certaines expériences sur le mélange d'air et d'oxyde d'azote au-dessus de l'eau. Ces expériences furent d'abord consignées par Dalton dans son cahier au cours d'octobre–novembre 1803, et furent ajoutées à la communication après qu'elle eût été présentée. On y lit que « l'oxygène se combine avec une certaine quantité de gaz azoteux, ou avec le double de celle-ci, mais avec aucune quantité intermédiaire ». Dans un renvoi en bas de page du discours imprimé, il écrit: « L'étude des poids relatifs des particules ultimes des corps est, à ma connaissance, un sujet tout-à-fait nouveau: je l'ai poursuivie récemment avec le plus vif succès. Je ne puis discuter ici du principe, mais je me contenterai d'adjoindre les résultats, pour autant qu'ils semblent acquis par mes expériences. » Suit alors une liste des « poids relatifs des particules ultimes de corps gazeux et autres », la première table de poids atomiques, qui est incorrecte d'un bout à l'autre (sauf pour l'étalon, hydrogène = 1).

En 1804 Thomas Thomson se rendit chez Dalton à Manchester, et en 1807 il publia la première version détaillée de la théorie atomique de Dalton dans le troisième volume de la troisième édition de son *System of Chemistry*, alors que le premier volume du livre de Dalton lui-même, *New System of Chemical Philosophy*, ne devait paraître qu'en 1808, et ne contenait qu'un bref chapitre sur la théorie. Dans son livre, *History of Chemistry* (1830), Thomson attribue l'origine de la théorie de Dalton à l'observation des proportions multiples dans les analyses de gaz des marais et d'éthylène explosés avec de l'oxygène, alors que la théorie avait déjà un an d'existence, et peut-être plus, avant que ces analyses ne fussent faites pour la confirmer. La théorie provient en fait des hypothèses sur les mélanges de gaz, émises en vue de réconcilier la théorie de Newton sur l'atmosphère (supposant qu'elle était un élément), avec la notion nouvelle qu'elle était un mélange de deux gaz permanents et de vapeur d'eau.

Le calcul des poids atomiques reposait sur quelques règles empiriques, dont la première exigeait que si l'on ne connaissait qu'un seul composé à partir de deux éléments, son « atome composé » contient un atome de chaque élément, « à moins qu'une cause quelconque ne démontre le contraire »; cette règle était basée sur l'idée de la répulsion entre atomes semblables. Dalton supposait que les particules d'oxygène, d'azote, etc., étaient des atomes, et non des molécules composées de deux atomes. Il n'acceptait pas l'hypothèse d'Avogadro, et mettait en doute l'exactitude de la loi des volumes de Gay-Lussac.

Bien que ses propres symboles en forme de cercles fussent très incommodes, Dalton n'accepta jamais ceux de Berzélius (encore en usage), disant qu'ils étaient « horribles ». On constate le même conservatisme chez lui, lorsqu'il refusa d'accepter les vues de Davy sur la composition des alcalis, des alcalino-terreux et du chlore.

La théorie atomique était connue depuis le temps des philosophes grecs, et on l'avait appliquée à certains problèmes physiques avant Dalton. Sa contribution personnelle est de l'avoir adaptée aux besoins de la chimie, d'une part, en assignant des poids différents aux atomes des divers éléments chimiques, et, d'autre part, en attribuant aux atomes des proportions de combinaison qui lui semblaient probables, permettant ainsi de calculer les poids relatifs des atomes au moyen des rapports des poids de leurs combinaisons. Ces résultats expliquaient d'un seul coup toutes les lois connues de la combinaison chimique. Les extensions ultérieures de la théorie en ont élargi et approfondi la teneur, mais dans ses grandes lignes c'est toujours la théorie atomique de Dalton.

Le microscope polarisant

B. K. JOHNSON

Le microscope polarisant sert depuis longtemps dans les recherches géologiques et minéralogiques. Cependant on ne s'est peut-être pas encore rendu compte de toutes ses possibilités en métallurgie, en biologie et en chimie. Dans cet article on expose les principes fondamentaux de l'emploi du microscope polarisant et on donne des exemples d'applications à des problèmes pratiques, tout particulièrement dans ces nouveaux domaines.

L'emploi de lumière polarisée avec un microscope en augmente considérablement l'utilité dans certaines branches de la science. Parmi celles-ci c'est peut-être la géologie qui a été la première à en bénéficier, car le travail original de Sorby dans ce domaine remonte à 1860. On a fait depuis des travaux très intéressants avec le microscope polarisant. Récemment on l'a utilisé en biologie et en métallurgie.

L'aspect particulier de certaines préparations au microscope polarisant en permet l'identification beaucoup plus facile, et ceci d'une manière qui ne serait pas possible par observation en lumière ordinaire. Par exemple, on identifie de cette manière de très petites particules cristallines, des minéraux, etc. Dans les préparations biologiques il devient beaucoup plus facile de différencier les membranes fibreuses dans d'autres tissus; dans des préparations métallurgiques on peut reconnaître parfois des inclusions et observer les résultats des efforts.

Dans la lumière polarisée rectilignement il y a une seule direction de vibration perpendiculaire à la direction de propagation. On peut produire une telle lumière par diverses méthodes optiques, dont voici quelques-unes:

1. Par réflexion sur un miroir sous l'incidence convenable.
2. Par l'emploi d'un prisme de Nicol ou d'une modification de ce genre de prisme.
3. Par passage au travers d'une plaque de tourmaline taillée parallèlement aux axes optiques.
4. Par passage au travers d'une plaque Polaroïd (composé d'iode et de sulfate de quinine, qui cristallise en minces lames plates).

Si deux de ces polariseurs sont orientés avec leurs axes de vibration parallèles, l'un à la suite de l'autre, l'observateur placé derrière le deuxième polariseur (quelquefois appelé analyseur) verra de la lumière. Mais si à ce moment on fait tourner l'un d'eux de 90°, aucune lumière ne passera. On dit alors que l'on a des Nicols croisés. Dans le premier cas on avait des Nicols parallèles.

En mettant entre Nicols croisés des échantillons tels qu'un morceau de verre, de quartz, de cellophane ou de sélénite (sulfate de calcium), et en les faisant tourner dans un plan perpendiculaire à la direction de l'observation, on trouve qu'ils se comportent différemment dans la transmission de lumière au cours de la rotation. Par exemple, le verre (pourvu qu'il soit homogène et sans tension) ne changera rien au champ obscur que donnent deux Nicols croisés; par contre, le quartz apparaîtra alternativement sombre et lumineux chaque fois qu'on l'aura fait tourner de 45° (voir figure 1*a* et *b*); le morceau de cellophane, s'il est fin et d'une épaisseur uniforme, sera coloré; quant à la mince plaque de sélénite (qui, en général, se clive en couches d'épaisseurs différents), elle aura un aspect multicolore quand elle sera orientée à 45° des Nicols croisés (figure 1).

L'effet produit par les trois derniers échantillons est dû à leur nature biréfringente. On peut mettre en évidence cette propriété bien connue de certains corps par une des premières expériences de Huygens. On pose un rhomboèdre de spath d'Islande (calcite) sur un texte imprimé et l'on voit deux images au lieu d'une seule (figure 12). Dans une autre expérience (figure 13), si l'on observe une fente lumineuse à travers un cristal de quartz poli, on voit deux spectres. Si l'on place alors un polariseur successivement sur chaque faisceau on voit que chaque faisceau est polarisé lui-même rectilignement mais que les deux directions de vibration correspondantes sont perpendiculaires. Cette expérience nous montre également une autre chose importante: les déviations des deux faisceaux sont inégales, donc le quartz a deux indices différents pour les deux faisceaux; donc ceux-ci se propagent avec des vitesses différentes dans ce milieu.

Ceci nous aidera à comprendre beaucoup des phénomènes de polarisation que nous observerons. Par exemple, si une mince lame à faces parallèles d'une substance biréfringente, placée à 45° entre Nicols croisés et éclairée en lumière blanche, présente une coloration, c'est parce que les deux rayons traversent la lame avec des vitesses différentes et présentent une « différence de marche » ou « différence de phase » d'une demi-longueur d'onde pour une couleur du spectre. Cette couleur est par suite éliminée par « interférence ». On voit finalement de la lumière blanche moins la couleur éliminée.

Ces explications ne sont cependant pas entièrement correctes. On comprendra mieux la question par une étude plus précise des phénomènes de polarisation en général. Nous conseillons aux lecteurs de consulter les références [1, 2, 3, 4].

L'intérêt de l'emploi de lumière polarisée dans différentes recherches est clairement mis en évidence sur les microphotographies en couleur des figures 1, 2 et 3 par comparaison avec l'aspect correspondant en lumière naturelle.

Pour transformer un microscope ordinaire en microscope polarisant il suffit dans les cas les plus simples de deux polariseurs. On monte l'un en avant du condenseur et l'autre au-dessus de l'oculaire, mais il faut pouvoir le retirer lorsque c'est nécessaire. Polariseur et analyseur peuvent tourner autour de l'axe du microscope de même que la platine qui supporte la préparation. Dans certains instruments plus perfectionnés on peut introduire des systèmes optiques permettant de faire certains essais particuliers sur les échantillons. Par exemple, il faudra pouvoir adapter sur le tube un compensateur, une lame-onde, et une lentille de Bertrand dont on dira plus loin l'utilité. Par suite le système optique sera celui qui est représenté sur la figure 14: P est le polariseur (d'habitude un Nicol) placé juste au-dessous du condenseur C. Il peut tourner autour d'un axe vertical. S est la platine tournante où l'on place l'échantillon, O l'objectif du microscope, E l'oculaire et A l'analyseur, un petit Nicol, ou une tourmaline, ou un polaroïd. Il y a à droite de la figure quelques dispositifs auxiliaires.

MESURE DE LA BIRÉFRINGENCE

La détermination numérique de la biréfringence d'un minuscule échantillon est l'une des mesures les plus importantes que l'on puisse faire avec un microscope polarisant, car c'est souvent la clé de son identification.

On appelle biréfringence la différence des indices de réfraction ($N_1 - N_2$) d'une matière pour les deux rayons. Comme il existe des tables où les substances sont classées par biréfringence,[1] on peut ainsi faire une identification.

On mesure la différence de marche R des deux faisceaux lorsqu'ils traversent une lame de la substance et l'épaisseur t de cette lame. La biréfringence $N_1 - N_2$ est égale à R/t.

On mesure la différence de marche R par un compensateur. C'est un mince coin en matière biréfringente uniaxe (comme le quartz) taillé avec ses faces parallèles à l'axe optique (figure 11). On le place entre Nicols croisés à 45° de la direction de vibration du polariseur et on l'éclaire en lumière monochromatique. On voit alors des bandes obscures. Elles correspondent aux positions où l'épaisseur du coin est telle que la différence de marche entre les deux rayons (due à la biréfringence du quartz) est d'une demi-longueur d'onde ou d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde de la lumière utilisée. Par exemple, on voit un coin de ce type éclairé en lumière rouge monochromatique ($\lambda = 6.200$ Å) sur la figure 5. On peut voir les bandes d'interférence et leur position relative sur l'échelle.

Si, par contre, on emploie de la lumière blanche, on verra une série de couleurs d'interférence. Chacune correspond à un retard particulier. On voit sur la figure 4 ces couleurs dites « couleurs d'interférence ». On part de noir lorsque l'épaisseur du coin est nulle, puis apparaissent d'abord des teintes bleu-gris, suivies par du jaune, de l'orange, du rouge à mesure que le retard s'accroît. Quincke a étudié l'ordre dans lequel ces couleurs apparaissent pour des retards connus. La table qu'il donne est reproduite p. 63.

Evidemment, la couleur d'un échantillon observé en lumière polarisée donne des indications intéressantes sur le retard relatif. Cependant il peut être difficile, sans une longue expérience, de reconnaître sans ambiguïté une des nombreuses teintes de la table ci-dessus observée toute seule au microscope. C'est pourquoi il est très important de pouvoir introduire un compensateur dans le microscope. Car si l'on peut voir simultanément dans le champ l'image colorée de l'échantillon et les couleurs du compensateur, on pourra faire des comparaisons. Ainsi on voit sur la figure 6 un échantillon dont la couleur peut être dite violette. En comparant avec les couleurs données par le compensateur (au bas de la figure 6) on peut décider que la couleur correspondante est un carmin du troisième ordre de la

[1] *Manual of Petrographic Methods*, p. 373, réf. 5.

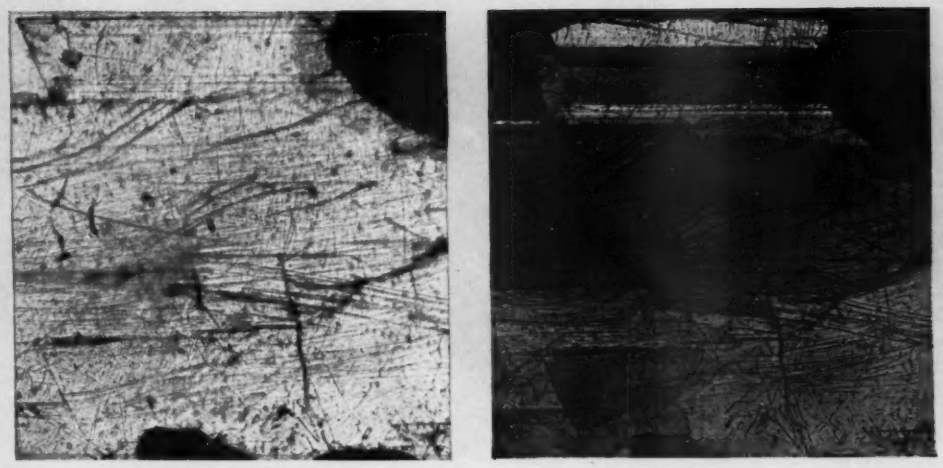


FIGURE 1 – *Aspect en lumière naturelle (à gauche) et en lumière polarisée (à droite) d'une lame de sélénite obtenue par clivage.*

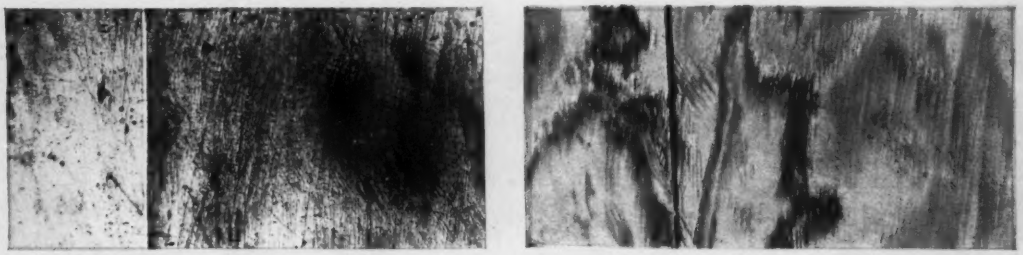


FIGURE 2 – *Microphotographie d'une mince lame de corne naturelle prise (à gauche) en lumière naturelle, et (à droite) en lumière polarisée. On a photographié chaque fois la même partie de l'échantillon.*

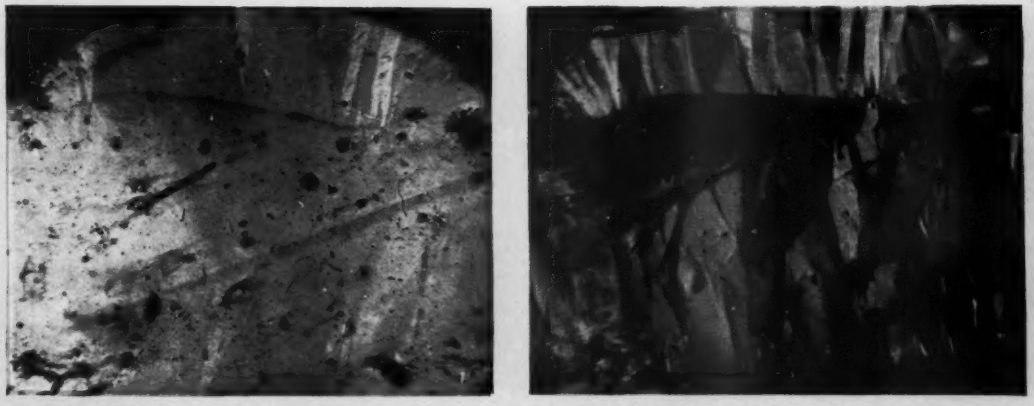


FIGURE 3 – *Microphotographie d'un objet opaque (sulfure de cuivre) prise en lumière naturelle (à gauche) et en lumière polarisée (à droite). On a photographié chaque fois la même partie de l'échantillon.*

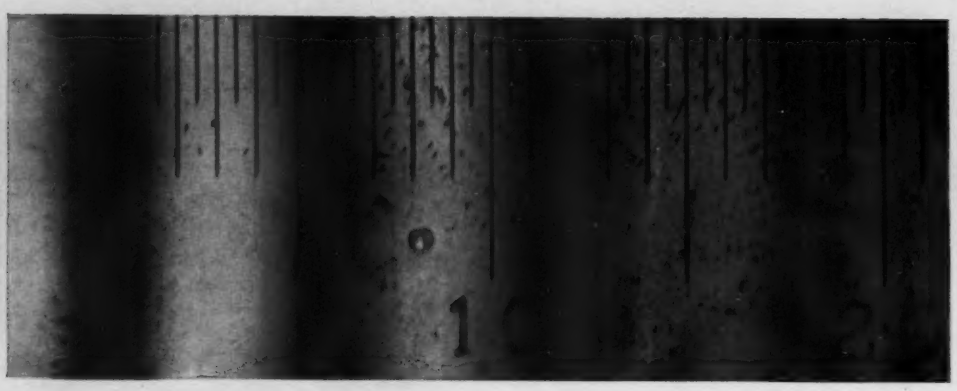


FIGURE 4 – *Ordre des couleurs de polarisation. L'échelle graduée aide à déterminer le retard d'après la couleur (une lecture de* 10 *sur l'échelle correspond à un retard de* 1 *micron).*

FIGURE 5 – *Bande d'interférence produite par un compensateur éclairé en lumière monochromatique.*

FIGURE 6 – *Mesure de retard par superposition de l'image d'un échantillon au compensateur.*

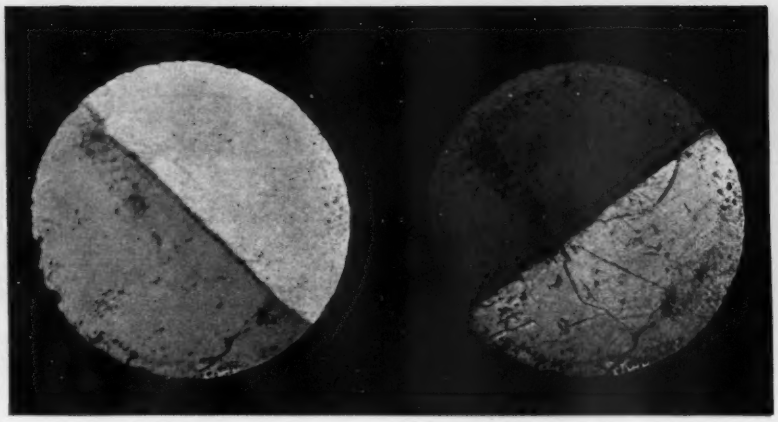


FIGURE 7 – *Mesure de retard par une lame-onde.*

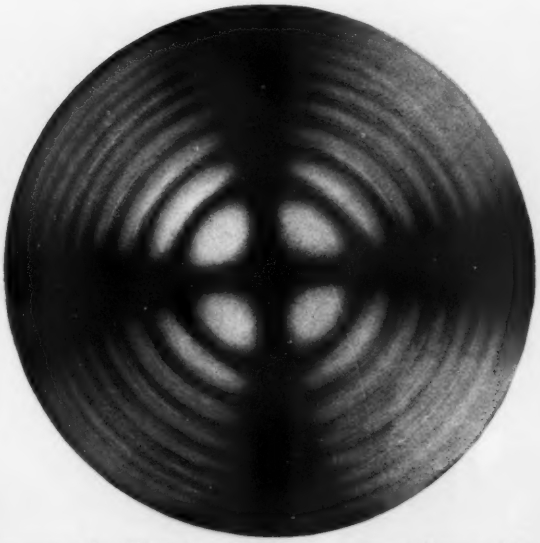


FIGURE 8 – *Figure caractéristique « anneau et brosse » d'un cristal uniaxe en lumière polarisée convergente.*

FIGURE 9 – *Aspect « deux yeux » d'un cristal biaxe en lumière polarisée convergente.*

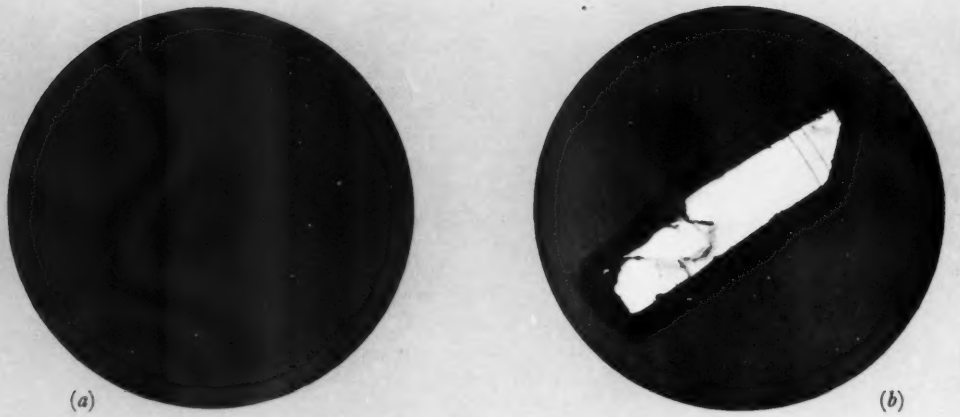


FIGURE 10 – *Aspect d'un petit cristal de quartz entre Nicols croisés placé (à gauche) parallèlement à la direction de vibration du polariseur, (à droite) à 45° de celle-ci.*

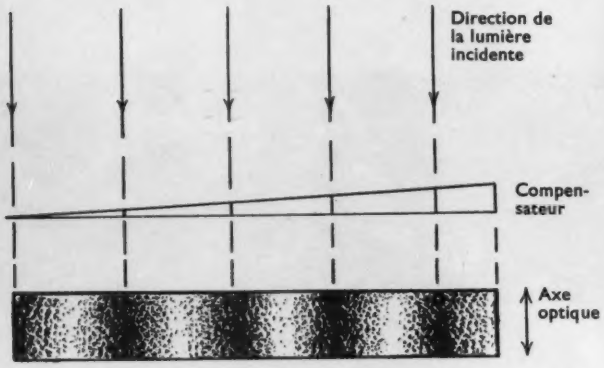


FIGURE 11 – *Représentation schématique du rôle d'un compensateur en substance biréfringente uniaxe, comme le quartz. Les bandes correspondent aux épaisseurs de la lame où le retard entre les rayons atteint une demi-longueur d'onde, ou un nombre impair de demi-longueurs d'onde.*

FIGURE 12 – *Double réfraction produite par un rhomboëdre de calcite.*

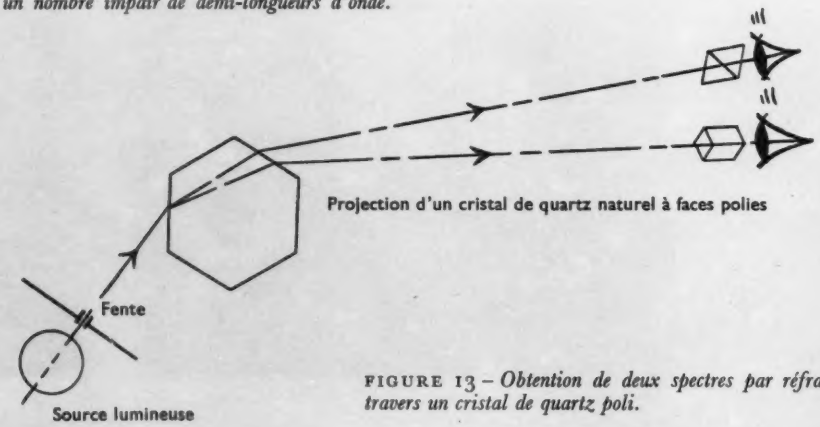


FIGURE 13 – *Obtention de deux spectres par réfraction à travers un cristal de quartz poli.*

TABLE DES COULEURS DE POLARISATION

Retard en microns pour $\lambda = 5.893$ Å	*Couleurs d'interférence entre Nicols croisés*	*Ordre*
0,00	Noir	PREMIER
0,04	Gris-fer	
0,097	Gris-lavande	
0,158	Gris-bleu	
0,218	Gris plus clair	
0,234	Blanc verdâtre	
0,259	Blanc	
0,267	Blanc jaunâtre	
0,281	Jaune-paille	
0,306	Jaune clair	
0,332	Jaune vif	
0,430	Jaune-brun	
0,505	Orangé rougeâtre	
0,536	Rouge	
0,551	Rouge foncé	
0,565	Pourpre	SECOND
0,575	Violet	
0,589	Indigo	
0,664	Bleu-ciel	
0,728	Bleu-vert	
0,826	Vert clair	
0,850	Vert-jaune	
0,910	Jaune	
0,948	Orange	
1,101	Rouge-violet	
1,128	Violet-bleu	TROISIÈME
1,151	Indigo	
1,258	Vert-bleu	
1,334	Vert d'eau	
1,426	Vert-jaune	
1,495	Couleur chair	
1,534	Carmin	
1,621	Rouge terne	
1,652	Gris-violet	QUATRIÈME
1,682	Gris-bleu	
1,711	Vert d'eau terne	
1,744	Vert-bleu	

table de Quincke, ce qui correspond à un retard de 1,53 microns. On peut en avoir une vérification supplémentaire en superposant l'image de l'échantillon et celle d'une moitié du compensateur comme on le montre au centre de la figure 6. La bande noire du retard nul s'est déplacée jusqu'à être en face de la couleur présumée, ce qui prouve que l'on avait fait la détermination correcte pour l'échantillon étudié. Il suffira alors d'en mesurer l'épaisseur (soit par une vis micrométrique, soit par la méthode microscopique). La relation déjà donnée permet alors de calculer la biréfringence.

On peut aussi remplacer le compensateur par une lame-onde. Manifestement, celle-ci est relativement plus simple à fabriquer. C'est en général une lame de mica obtenue par clivage. Son épaisseur est telle qu'elle présente une couleur de polarisation prononcée et définie voisine de celle du centre de la table. Sur la figure 7 l'auteur a montré une lame-onde qui présente un pourpre du second ordre (retard 0,565) placée à 45° entre Nicols croisés; on superpose l'image de l'échantillon à celle de la moitié de la lame-onde et l'on fait tourner la platine jusqu'au maximum de lumière. On voit alors une certaine couleur (dans ce cas jaune-paille). Par rotation de l'échantillon de 90° cette moitié du champ devient jaune-vert. En s'en rapportant à la table, on remarquera que dans un cas la couleur est descendue dans l'échelle de polarisation jusqu'à un retard de 0,281. Dans l'autre cas on s'est élevé dans l'ordre des couleurs jusqu'à un retard de 0,850. On prendra la lame-onde (0,565) comme référence et on verra que la quantité dont la couleur est « descendue » dans l'échelle (0,565 — 0,281) est la même que celle dont la couleur est « montée » dans l'échelle (0,850 — 0,565). Le retard introduit par l'échantillon est donc 0,284 microns.

LUMIÈRE POLARISÉE CONVERGENTE

En minéralogie, la lumière polarisée convergente permet de différencier les cristaux uniaxes des cristaux biaxes. On voit sur les figures 8 et 9 leurs aspects caractéristiques respectifs. Une explication détaillée demanderait plus de place que celle dont nous disposons ici. (*Voir* références [1, 2, 4].)

Dans l'examen en lumière convergente on peut considérer que la lumière déjà polarisée, part du plan focal image du condenseur du microscope (*voir* figure 15). Cette lumière traverse l'échantillon en faisceaux parallèles diversement inclinés sur l'axe du microscope; ils sont focalisés dans le plan focal objet de l'objectif où l'on peut examiner les effets de polarisation. Pour cela on introduit dans le tube du microscope une lentille auxiliaire appelée lentille de Bertrand à la position indiquée sur le diagramme (figure 15). Celle-ci fait avec l'oculaire un système microscopique à faible puissance pour l'observation du plan focal objet de l'objectif. Ceci ressort clairement du schéma de la figure, de même que la traversée de l'échantillon par des faisceaux parallèles de rayons d'inclinaisons diverses. Le terme « lumière convergente » se rapporte en fait à des faisceaux convergents de rayons (polarisés) traversant l'objet

plutôt qu'à un cône de rayons fortement convergents comme on aurait pû le croire d'abord.

Avec cette disposition du microscope on peut observer les figures d'interférence produites par l'échantillon, soit la figure « anneau et brosse » caractéristique des cristaux uniaxes, soit l'aspect « deux yeux » des cristaux biaxes.

ROTATION OPTIQUE

Si l'on place une mince lame de quartz dont les faces sont taillées perpendiculairement à l'axe optique, entre Nicols croisés, en lumière monochromatique, l'analyseur transmet de la lumière. Mais en le faisant tourner, on trouvera une position pour laquelle il y a extinction. Il s'en suit donc que la lumière qui sort du quartz est polarisée rectilignement et que le plan de vibration de la lumière a tourné. Ce phénomène découvert par Arago au début du XIXème siècle et ensuite étudié complètement par Biot s'appelle rotation optique. Il se produit non seulement avec le quartz mais aussi avec de nombreux autres cristaux et avec des liquides tels que la térébenthine, la nicotine, les solutions de sucre, etc.

Pour une substance donnée, l'angle de rotation du plan de vibration est proportionnel à l'épaisseur de la lame[1]; pour une épaisseur donnée, cet angle est inversement proportionnel au carré de la

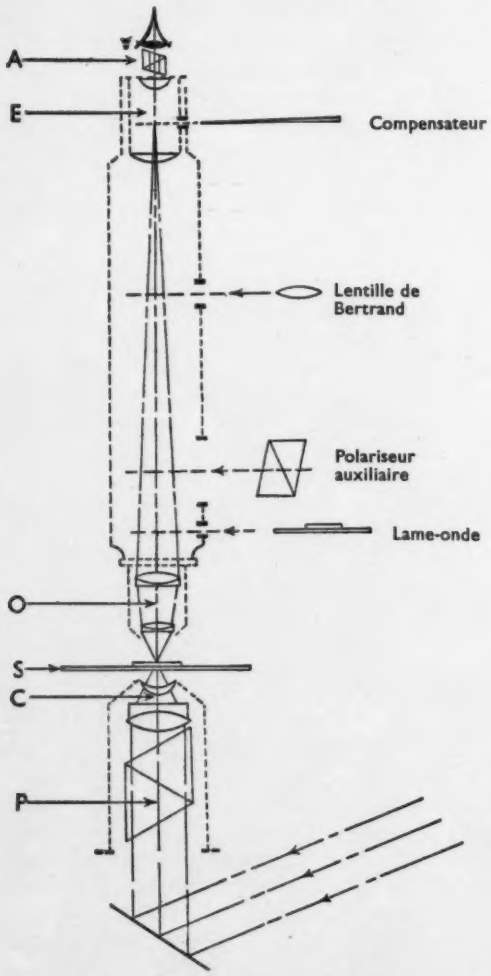


FIGURE 14 – *Système optique d'un microscope polarisant.*

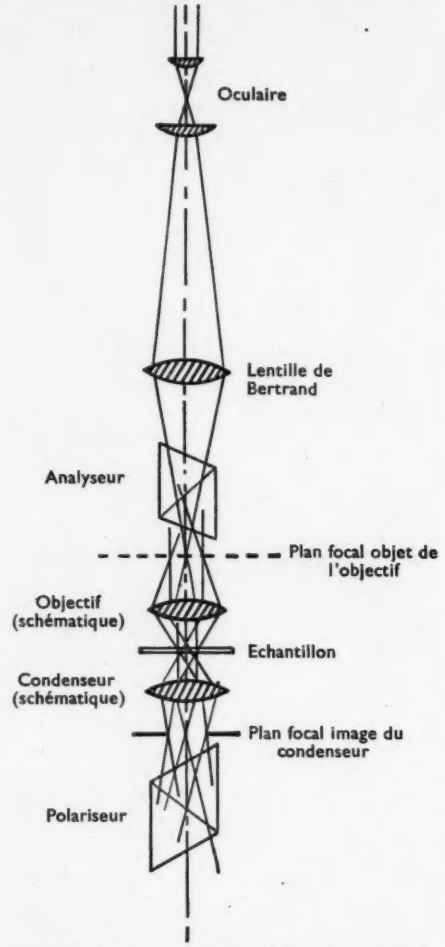


FIGURE 15 – *Disposition des pièces optiques pour l'observation en lumière dite convergente (figure schématique).*

[1] Par exemple, une lame de quartz de 1 mm d'épaisseur produit une rotation du plan de polarisation de 21,7° pour la lumière de longueur d'onde 5.893 Å (raie du sodium).

longueur d'onde de la lumière utilisée. Dans le cas d'une solution optiquement active d'épaisseur donnée, la rotation est très sensiblement proportionnelle au poids de substance active dissoute par unité de volume de la solution.

On a appliqué ces principes à des études industrielles et autres, dans l'emploi des polarimètres et des saccharimètres. On peut aussi les utiliser pour le travail au microscope polarisant. Par exemple, l'instrument sera disposé comme sur la figure 15 sans objet sur la platine et avec les Nicols parallèles. On verra alors une image circulaire du diaphragme inférieur dans le plan focal objet de l'objectif. On croise alors les Nicols (ce qui donne un champ sombre) et on peut faire une lecture sur le cercle gradué solidaire du polariseur.[1] Si l'on place sur la platine une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, le champ s'éclaire. On peut ramener l'obscurité par rotation du polariseur. La détermination de la rotation produite et de l'épaisseur de l'échantillon permet de calculer la rotation par millimètre; cela peut donner une possibilité d'identification de l'échantillon. On peut procéder de même avec un liquide contenu dans une cuve d'épaisseur connue placée sur la platine. La précision ne sera pas très grande, car la rotation par millimètre de la plupart des liquides actifs est plus faible et les dimensions de la cuve sont limitées par la distance entre l'objectif et la platine du microscope. Cependant, ceci peut fréquemment servir à identifier un échantillon en tant qu'essai auxiliaire.

[1] Il faut employer de la lumière monochromatique.

En conclusion, on réalisera que cet article ne traite que des applications générales de la lumière polarisée en microscopie. On connaît bien l'emploi intensif du microscope polarisant en géologie et en minéralogie; jusqu'à présent on l'a moins employé en biologie. Des travaux récents d'analyse de substances organiques aux rayons X ont montré qu'elles présentaient des molécules arrangées dans un ordre très régulier. Elles se comportent comme des substances biréfringentes dans l'examen en lumière polarisée. Par suite, une étude systématique (par exemple, l'établissement de tables de biréfringence pour de telles substances) peut se révéler extrêmement utile.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FINCHAM, W. H. A. *Optics*, 318–42 (Hatton Press).
[2] MARTIN, L. C. *Applied Optics*, vol. 1, 187–225 (Pitman).
[3] JOHNSON, B. K. *Practical Optics*, 131 (Hatton Press).
[4] *Dictionary of Applied Physics*, vol. iv, 490–511 (Macmillan).
[5] JOHANNSEN, A. *Manual of Petrographic Methods*, 371, 373 (McGraw-Hill).
[6] *Proc. Geologists' Assoc.*, 1909, vol. 21 (partie 2).

De la structure en chimie minérale

W. WARDLAW

L'homme de sciences, toujours occupé par les problèmes de son propre champ d'activité, a généralement peu l'occasion de réfléchir au passé, au présent et au futur des autres disciplines. C'est avec cette pensée que l'auteur a essayé de discuter quelques-uns des remarquables progrès du domaine de la structure en chimie minérale et de signaler quelques-uns des problèmes non résolus. Beaucoup de conceptions fondamentales ont dû être abandonnées ou modifiées à la lumière de travaux récents.

La plupart des étudiants en chimie savent que le Français Joseph Louis Proust, Professeur de Chimie à l'Université de Madrid, a découvert que les poids de cuivre contenus dans la malachite, carbonate de cuivre naturel, et dans le carbonate de cuivre préparé artificiellement sont dans la même proportion. Frappé par ce phénomène, il analysa un grand nombre de substances et en 1799 il résuma ses conclusions dans la loi des proportions définies qui dit que le même corps est toujours composé des mêmes éléments unis dans les mêmes proportions. Ces dernières années, cependant, des preuves se sont accumulées — principalement grâce à la chimie des cristaux — qui tendent fortement à bouleverser nos idées sur cette loi fondamentale des combinaisons chimiques.

La loi des proportions définies est strictement observée par les substances composées de molécules stables et parfaitement définies, telles que l'azote, le gaz carbonique, l'hydrogène, etc. Elle s'applique aussi rigoureusement aux composés formés de deux ions, tels que le sel ordinaire ou le carbonate de calcium. Cela signifie essentiellement que la loi des proportions définies repose sur le sens des liaisons électroniques dirigées ou sur la neutralisation entre les charges ioniques positives et négatives. Il peut aussi y avoir des composés, cependant, qui suivent cette loi si les conditions de l'arrangement géométrique dans le cristal sont telles que les dimensions des divers composants soient très différentes et que les structures s'accordent bien entre elles. Les aluns sont d'excellents exemples qui n'existent naturellement qu'à l'état cristallin. Quand les éléments qui composent le cristal varient légèrement de dimension et de forme, ils peuvent occuper indifféremment les mêmes positions.

Un groupe important de substances dans lesquelles les proportions combinées peuvent varier et où les lois des valences ne sont qu'approximativement respectées est formé par les sulfures, arséniures et antimoniures métalliques. Si l'on se reporte à la littérature chimique, on verra que les analystes ont donné à la pyrrhotine des formules allant de Fe_6S_7 à $Fe_{11}S_{12}$. Historiquement, ces découvertes sont d'un grand intérêt relativement à la controverse qui eut lieu entre Proust et Berthollet en 1803. On peut expliquer clairement les différentes compositions en supposant que des atomes additionnels de soufre s'encastrent dans un réseau idéal FeS. Cette explication ne peut être soutenue, car les cristallographes ont montré qu'il n'y a pas suffisamment de place dans un tel réseau pour contenir des atomes de soufre. Deux autres explications raisonnables se présentent. C'est peut-être que dans le réseau des atomes de soufre remplacent dans une certaine mesure des atomes de fer, ou bien qu'il y a des positions d'atomes de fer vacantes. Le travail de Hägg et Sücksdorff [1] en 1933 a démontré que la dernière explication était la bonne. Les auteurs comparent les densités et les dimensions de la cellule unitaire d'un nombre d'échantillons de pyrrhotine, et leurs résultats sont résumés dans la figure 1 extraite de leur article. La courbe supérieure montre l'influence sur la densité de la substitution du soufre au fer tandis que la courbe inférieure montre le résultat obtenu en retirant des atomes de fer de certains points du réseau. La conclusion est claire. Les variations de composition de la pyrrhotine sont le résultat du retrait d'atomes de fer de certains points du réseau. Les rayons X ont ainsi aidé à résoudre un problème de grande importance. Le terme « structure lacunaire » (*defect structure*) a été proposé en 1936 pour de telles structures. Dans certains types de composés, ils sont la règle plutôt que l'exception.

Il faut alors se demander où en sont les lois des proportions définies et des proportions multiples. Ces lois ont été formulées à une époque où les composés chimiques connus étaient d'un type

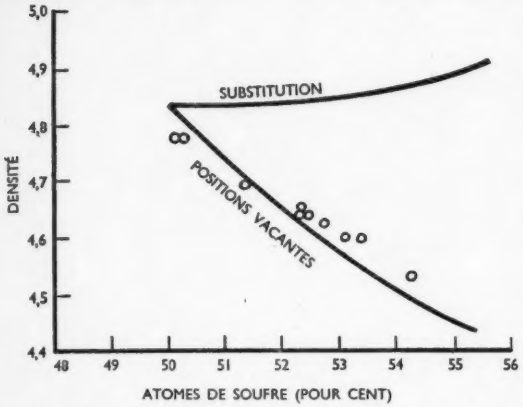
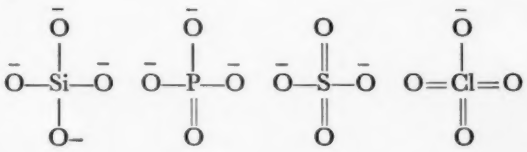


FIGURE 1 – *Les cercles montrent les variations de densité observées avec la composition.*

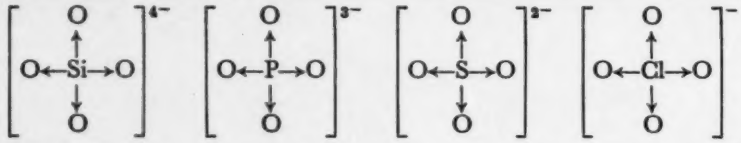
simple. A la lumière de connaissances plus complètes, on a reconnu que ces lois n'étaient applicables qu'à un nombre restreint de types de composés chimiques. Beaucoup d'hydrures, de phosphures, de sulfures, de séléniures, d'arséniures, certains oxydes et iodures et certains complexes font exception à la règle [2].

Dans le domaine de la chimie minérale, l'étude de l'organisation des atomes en corps solides a permis d'étudier les problèmes de la chimie sous un angle tout à fait nouveau. Il y a eu une époque en chimie minérale où l'on a imaginé toute une série d'acides siliciques pour correspondre à la composition de silicates minéraux. A l'heure actuelle, il est établi que les roches sont constituées par des atomes d'oxygène réunis par du silicium, de l'aluminium et quelques autres atomes métalliques. On sait que les huit éléments courants — oxygène, silicium, aluminium, fer, magnésium, calcium, sodium et potassium — entrent pour 98% dans la composition de l'écorce terrestre, et que la masse est formée d'oxygène. Chaque atome de silicium est entouré par quatre atomes d'oxygène de telle façon que les quatre oxygène se groupent aux sommets d'un tétraèdre au centre duquel se trouve le silicium. En outre, la plus grande partie de l'aluminium de l'écorce terrestre est distribuée de la même façon que le silicium. Le fer, le magnésium et le reste de l'aluminium sont distribués autrement. Six oxygène sont groupés aux sommets d'un octaèdre avec un atome de fer, de magnésium ou d'aluminium au centre. Donc l'aluminium peut jouer un double rôle, s'unissant généralement dans un tétraèdre à l'oxygène, mais quelquefois se comportant comme le fer et le magnésium. Enfin les ions alcalins et alcalino-terreux se trouvent dans de vastes lacunes de la structure, souvent asymétriques. Le feldspath potassique, l'un des plus importants constituants minéraux rocheux, a la formule empirique $KAlSi_3O_8$. Les limites d'une telle formule en chimie minérale sont bien expliquées par ce cas spécial. Le feldspath est effectivement composé par des tétraèdres de silicium et d'aluminium réunis par chaque sommet et dans toutes les directions et formant un réseau à trois dimensions de tétraèdres. Les ions potassium sont pris dans les interstices. Il est très intéressant qu'il n'y ait jamais de magnésium ni de fer dans les feldspaths. En effet, il est géométriquement impossible de joindre des octaèdres à une construction de tétraèdres reliés par tous leurs sommets. En conséquence, le magnésium et le fer, qui ont 6 liaisons de coordination avec les atomes d'oxygène, sont exclus de la structure du feldspath. Un succès marquant de l'application de la méthode des rayons X aux problèmes de la chimie minérale se trouve dans le travail d'avant-garde de Sir Lawrence Bragg, qui a démêlé les complexités des structures des silicates.

La structure des ions du type XO_4 est particulièrement intéressante. La formule classique montrait l'atome central avec la valence du groupement:



Jusqu'à ces temps derniers, ces formules étaient tombées en désuétude, principalement à cause du succès avec lequel de nombreux composés pouvaient être systématisés si le groupe d'électrons de valence en contenait 8 — suggestion faite par G. N. Lewis en 1916. En supposant qu'une simple liaison corresponde au partage de deux électrons provenant chacun d'un atome, la formule classique nécessite pour les atomes centraux, Si, P, S et Cl, des électrons de valence aux nombres respectifs de 8, 10, 12 et 14. D'après la théorie de Lewis, cependant, une autre formule est possible si l'on suppose que les deux électrons reliant chaque atome d'oxygène puissent être fournis par l'atome central. Ce genre de liaison a été appelé covalence de coordination, et on lui a donné le symbole →. Les atomes Si, P, S et Cl peuvent alors former des ions comme suit:



Les mesures de parachor et les observations stéréochimiques ont étayé ces formules. En 1937 L. Pauling et L. O. Brockway [3] ont démontré que les longueurs des liaisons dans les ions oxy-acide ordinaires, déterminées par l'analyse des cristaux aux rayons X sont beaucoup plus courtes que celle des rayons des atomes dans la simple liaison de covalence. Les longueurs des liaisons dans les ions tétraédriques sont les suivantes:

	Si—O	*P—O*	*S—O*	*Cl—O*
Observées ..	1,60	1,55	1,51	1,48
Calc. X—O ..	1,83	1,76	1,70	1,65
X=O ..	1,65	1,58	1,53	1,48

Que signifie ce raccourcissement? Pauling interprète les résultats en indiquant qu'il y a une résonance entre différentes structures possibles avec des doubles liaisons réunissant un ou plusieurs atomes d'oxygène. Dans le cas du chlore, la distance Cl—O est celle qu'on attend d'une double liaison pure. En ce qui concerne ces ions oxy-acide, Pauling [4] suggère d'utiliser les formules classiques ordinaires. Evidemment, les formules classiques ne sont pas entièrement en accord avec les distances des liaisons données par la table. Les formules classiques nécessitent une résonance entre les liaisons simples et doubles, et les distances des liaisons définitives seraient plus grandes que les valeurs d'une double liaison de covalence. Il est évident, naturellement, qu'une covalence de coordination peut être plus courte qu'une simple liaison normale de covalence. Par exemple, la distance N—O est de 1,43 Å — plus grande, d'une manière appréciable que la longueur de la liaison azote-oxygène dans $(CH_3)_3N \rightarrow O$, qui est de 1,36 Å. Il est évident qu'à l'heure actuelle, il n'y a pas moyen de représenter ces ions par une formule à laquelle on ne puisse faire d'objections.

La structure de l'oxyde de carbone continue à exciter l'intérêt. Les premiers chimistes ont considéré le carbone comme bivalent dans cet oxyde et ont estimé que la formule C=O donnait toute satisfaction. Langmuir en 1919 a proposé une nouvelle formule dans laquelle le carbone avait un groupe de 8 électrons. Dans la première formule, il est clair que le groupe avait 6 électrons. Cependant, si le carbone et l'oxygène mettent en commun le doublet non encore partagé de l'oxygène:

$$:C::\ddot{O}:\ (ou\ C{=}O)\ \text{devient}$$

$$:\bar{C}:::\overset{+}{O}:\ (ou\ \bar{C}{\equiv}\overset{+}{O}).$$

Les arguments avancés en faveur de la structure de Langmuir à triple liaison renferment des considérations sur le moment du dipôle électrique, les distances entre les atomes, la constante de la force et la théorie de l'orbite moléculaire. Par exemple, Sidgwick [5] a fait ressortir en 1933 que le très petit moment du dipôle de l'oxyde de carbone ne peut être expliqué que si l'on suppose que le partage très inégal d'électrons entre le carbone et l'oxygène est compensé par le transfert d'un électron de l'oxygène au carbone. Pauling en 1939 a suggéré que la molécule CO doit être considérée comme une résonance des formes:

$$\bar{C}{\equiv}\overset{+}{O} \qquad C{=}O \qquad \overset{+}{C}{-}\bar{O}$$
$$(a) \qquad (b) \qquad (c)$$

Il a fourni des arguments pour étayer son opinion que les structures (*a*), (*b*) et (*c*) contribuent à peu près également à former l'état normal de la molécule. La très faible valeur du moment du dipôle prouve évidemment que la contribution apportée par la structure (*c*) doit être à peu près la même que celle apportée par la structure (*a*). Le moment du dipôle de la structure (*b*) ne serait pas élevé, tandis que ceux de (*a*) et de (*c*) sont très grands. Ce n'est que si (*a*) et (*c*) y contribuent à peu près également que le moment de la molécule peut être petit, ce qui concorde avec l'expérience. La grande stabilité de l'oxyde de carbone a fréquemment été utilisée comme un argument contre la formule C=O. L. H. Long et R. G. W. Norrish [7] en 1946 ont donné une explication plausible de la non-polymérisation de CO en O=C=C=O. Leur raisonnement montre que pour transformer la molécule CO en un radical avec deux valences libres, il faudrait une énergie de plus de 75 Kcal, et l'énergie nécessaire pour exciter ainsi deux molécules est plus grande que l'énergie correspondant normalement à la liaison C=C. Il semble donc raisonnable de conclure que les essais pour

préparer C_2O_2 n'ont pas réussi parce que cette substance est thermodynamiquement instable. En résumé, la double liaison de la formule C=O, quoique n'étant pas exempte d'objections est probablement la meilleure représentation pour cette molécule à l'heure actuelle.

Intimement associé au problème de la constitution de l'oxyde de carbone est celui de la structure des métaux carbonyles. Il y a eu à un certain moment de très bons arguments pour écrire les métaux carbonyles $M \leftarrow \overset{-}{C} \equiv \overset{+}{O}$ ou $\overset{-}{M}—C \equiv \overset{+}{O}$. Dans ce cas l'oxyde de carbone fournit deux électrons pour former une covalence de coordination avec l'atome métallique. Par des recherches par la méthode de diffraction des électrons, Brockway et Cross [8] en 1935 ont prouvé que la distance nickel-carbone était de 1,82 Å, tandis que la distance théorique pour une double liaison est d'environ 1,79 Å. Ceci étaye l'opinion que les liaisons nickel-carbone ont un fort pourcentage de doubles liaisons, et cela veut dire que CO doit être approximativement représenté par C=O. Cependant, tandis que dans ces conditions la structure du nickel-carbonyle est Ni=C=O, il y a probablement résonance, et on doit aussi prendre en considération la représentation

$$\begin{array}{l} | \\ —\overset{4-}{Ni} : C : : : \overset{+}{O}. \\ | \end{array}$$

On trouve une preuve de l'existence de ces deux types de liaison dans les résultats obtenus par l'analyse aux rayons X du solide $Fe_2(CO)_9$. Powell et Ewens [9] ont trouvé que trois des groupes CO forment des liaisons

$$\begin{array}{l} Fe \diagdown \\ \qquad C=O, \\ Fe \diagup \end{array}$$

comme dans les cétones. La distance C—O de ces groupes est environ 1,3 Å, comparable à celle des cétones, et beaucoup plus grande que celle des six groupes CO restant qui est de 1,15 Å. On suppose que la liaison dans ce cas est $\overset{-}{Fe}—C \equiv \overset{+}{O}$. D'après les données fournies par l'étude de la diffraction électronique, la structure du pentacarbonyle $Fe(CO)_5$ est une double pyramide triangulaire [10]. Ici les distances fer-carbone de 1,84 Å montrent la prédominance des doubles liaisons. Enfin la méthode de diffraction électronique, appliquée aux intéressants carbonyles solides $Cr(CO)_6$, $Mo(CO)_6$, et $W(CO)_6$ [11], qui peuvent se sublimer sans se décomposer, a montré une configuration d'octaèdre régulier avec des liaisons métal-carbone favorisant principalement les simples liaisons.

Beaucoup de formules de structure assignées à des composés chimiques se sont révélées erronées à la suite de connaissances plus complètes. Werner a indiqué que la formule de la malachite était:

$$\left[Cu \begin{pmatrix} HO \diagdown & \\ & Cu \\ HO \diagup & \end{pmatrix} \right] CO_3.$$

En réalité elle ne contient pas d'ion complexe, mais consiste en une répartition à trois dimensions des ions Cu^{2+}, CO_3^{2-}, et OH^-. Le chlorure $CsAuCl_3$ illustre le danger d'adopter une formule empirique. Celui-ci n'est pas un exemple d'or bivalent, mais un sel complexe qui contient de l'or monovalent et trivalent avec la composition $Cs_2Au'Au'''Cl_6$ [12]. On a démontré, par la méthode des rayons X, que le pentachlorure de phosphore était formé par des ions tétraédriques $[PCl_4]^+$ et octaédriques $[PCl_6]^-$ [13]. Une détermination approfondie [14] de la structure de $(NH_4)_3ZnCl_5$ a révélé que cette substance était formée par des ions NH_4^+, Cl^-, et $[ZnCl_4]^{2-}$, et que la véritable formule était $(NH_4)_2ZnCl_4NH_4Cl$. Comme dans le cas du pentachlorure de phosphore solide, la coordination à cinq branches a encore une fois été évitée.

BIBLIOGRAPHIE

[1] HÄGG, G., et SÜCKSDORFF, I. *Z. physical. Chem.*, 1933, B22, 444.

[2] ANDERSON, J. S. *Ann. Reports Chem. Soc.*, 1946, **43**, 104.

[3] PAULING, L., et BROCKWAY, L. O. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1937, **59**, 13.

[4] PAULING, L. *Nature of the Chemical Bond*, 1940, p. 242.

[5] SIDGWICK, N. V. *The Covalent Link in Chemistry*, 1933, p. 187.

[6] LONG, L. H., et WALSH, A. D. *Trans. Faraday Soc.*, 1947, **43**, 344.

[7] LONG, L. H., et NORRISH, R. G. W. *Proc. Roy. Soc.*, (A), 1946, **187**, 337.

[8] BROCKWAY, L. O., et CROSS, P. C. *J. Chem. Phys.*, 1935, **3**, 828.

[9] POWELL, H. M., et EWENS, R. V. G. *J. Chem. Soc.*, 1939, 286.

[10] EWENS, R. V. G., et LISTER, M. W. *Trans. Faraday Soc.*, 1939, **35**, 681.

[11] BROCKWAY, L. O., EWENS, R. V. G., et LISTER, M. W. *Ibid.*, 1938, **34**, 1350.

[12] ELLIOTT, N., et PAULING, L. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1938, **60**, 1846.

[13] POWELL, H. M., CLARK, D., et WELLS, A. F. *J. Chem. Soc.*, 1942, 642.

[14] KLUG, H. P., et ALEXANDER, L. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1944, **66**, 1056.

Exploration par fusée

ARTHUR C. CLARKE

La propulsion par fusée, qui était naguère le passe-temps de quelques enthousiastes, est devenue en moins d'une génération un champ reconnu de recherches physiques qui ont produit des résultats de grande importance pratique. Dans cet article Mr Clarke discute les bases mathématiques de la propulsion par fusée, particulièrement dans ses relations avec le problème de l'envoi de projectiles à grande altitude et dans l'espace lui-même, but qui ne semble plus désormais impossible à atteindre.

L'invention de la fusée date de 700 ans au moins, mais son développement comme arme de guerre révolutionnaire et comme instrument de recherche pour les hautes altitudes ne remonte qu'à une vingtaine d'années. C'est le Russe Ziolkovsky qui a fait la première étude scientifique des possibilités de la fusée à la fin du XIXème siècle, mais son travail demeura peu connu en dehors de son pays. On peut dire que l'époque moderne de ces recherches a commencé avec l'Américain R. H. Goddard (1882–1945) et le Roumain Hermann Oberth (1894–), dont le travail a fourni au sujet une base mathématique solide [1, 2].

La fusée doit ses propriétés remarquables à ce qu'elle est la plus simple et, potentiellement, la plus efficace de toutes les machines thermiques. Il n'y a pas de limite évidente aux dimensions d'un moteur à fusée que l'on puisse construire — par exemple la puissance du V2 dépassait 600.000 C.V., et on fait actuellement des recherches sur des engins beaucoup plus grands. De plus, comme la fusée ne fonctionne que par réaction et transporte son propre combustible et comburant, elle est tout à fait indépendante du milieu environnant. C'est ainsi que la propulsion par fusée est la seule forme de propulsion connue qui puisse fonctionner dans le vide où elle est en fait bien plus efficace que dans l'atmosphère.

C'est un problème essentiellement balistique que d'atteindre des altitudes considérables, car on peut traiter la fusée comme un simple projectile dans la plus grande partie de sa course. Pour des altitudes et des vitesses de projection ordinaires, la loi familière $h = v^2/2g$ est applicable (en négligeant la résistance de l'air), mais cette relation parabolique suppose la constance de g tout le long de la trajectoire, et lorsque la vitesse initiale dépasse 3 km/s, le projectile atteint des altitudes où la diminution de la gravité est appréciable. On voit sur la figure 1 ce qui se passe dans le cas d'une pesanteur constante et dans le cas de la loi correcte qui tient compte de la réduction de g avec la distance. On verra que la courbe d'altitude s'élève très rapidement pour des valeurs de la vitesse voisines de 10 km/s et qu'elle atteint en fait l'infini pour la « vitesse de fuite » de 11,2 km/s.

Jusqu'à présent les vitesses terminales les plus grandes atteintes par des fusées sont d'environ 1,5 km/s et les altitudes maxima sont de l'ordre de 180 km. On a obtenu ces résultats avec le V2, engin purement militaire, et l'emploi de fusées construites spécialement pour les recherches à haute altitude permettra d'atteindre de bien meilleurs records. On a publié récemment des détails sur une fusée à sondage (*Neptune*) actuellement en construction pour la Marine des Etats-Unis. On a reproduit sur la figure 2 les courbes des résultats obtenus parce qu'elles mettent bien en évidence les caractéristiques principales de ce genre de machines.

La fusée brûle son combustible (dans ce cas un mélange d'alcool et d'oxygène liquide) en 75 secondes. Pendant ce temps elle s'élève verticalement de 60 km et atteint une vitesse de 2,5 km/s. Ceci est suffisant pour lui permettre d'arriver à une altitude totale de 400 km. La durée totale du vol vertical est de 335 secondes. *Neptune* (qui sera en service à la fin de 1948) a été calculée pour transporter 50 kg d'instruments à une altitude de 400 km. Mais elle peut également transporter 1 tonne à 140 km.

Pour la première fois il a été possible de faire des lectures directes de températures et de pressions à des altitudes déjà largement dans l'ionosphère, et l'on a pu avoir récemment les premiers spectres du rayonnement ultra-violet du soleil qui ne traverse pas l'atmosphère. On a développé des techniques pour pouvoir transmettre continuellement des observations à des récepteurs sur le sol pendant le vol de la fusée, et il est maintenant

possible de récupérer des instruments non endommagés après leur chute sur la terre.

La vitesse atteinte par une fusée — et par suite son record d'altitude — dépend de deux facteurs: (1) la vitesse du jet et (2) le rapport de masses qui est le rapport entre le poids initial de la fusée et son poids final après épuisement du combustible. Si v est la vitesse du jet et R le rapport de masses

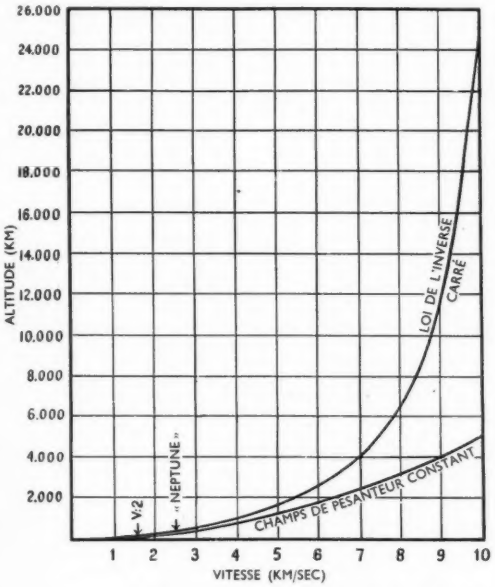


FIGURE 1 – *Relation entre vitesse de projection et altitude en supposant* (a) *la constance du champ de gravitation,* (b) *sa diminution selon la loi de l'inverse carré.*

en l'absence de toute autre force, la vitesse finale de la fusée sera:

$$V = v \log R.$$

Toutefois dans le cas d'une fusée projetée verticalement de la terre il faut tenir compte de la pesanteur et de la résistance de l'air. La vitesse finale lorsque tout le combustible est brûlé est alors réduite à

$$V = v \log R - gt - F(V,h),$$

où t désigne la durée de la combustion et $F(V,h)$ est une fonction compliquée de la forme, de l'altitude et de la vitesse de la fusée. Heureusement, comme le montre la figure 2, la résistance de l'air s'annule pratiquement lorsque s'accroissent la vitesse de la fusée et son altitude, et la perte d'altitude due à cette cause ne dépasse pas 10–20%. On pourrait la réduire de façon importante en lançant les fusées du sommet des

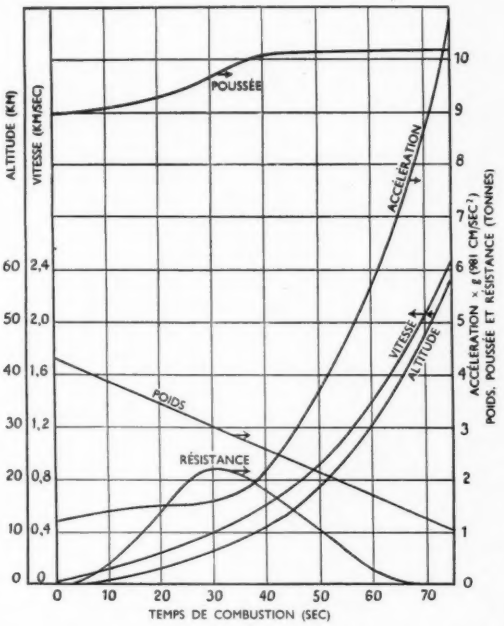


FIGURE 2 – *Courbes d'action calculées pour la fusée-sonde pour hautes altitudes* Neptune, *de la marine des E.-U.*

montagnes, ce qui peut avoir un certain intérêt dans quelques cas. On peut aussi réduire la perte de gravitation, gt, par l'emploi d'accélérations

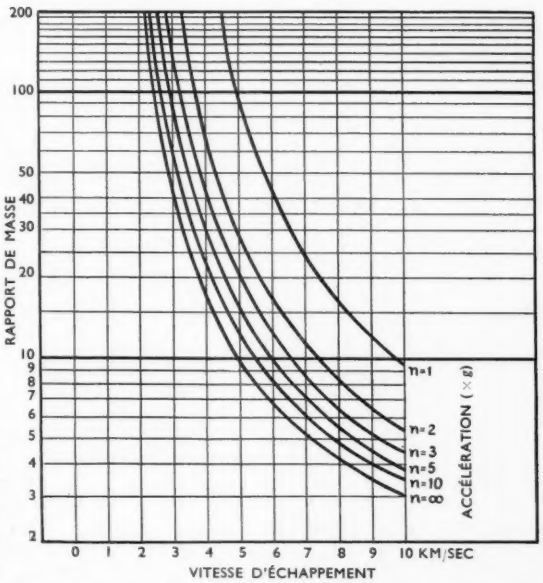


FIGURE 3 – *Relation entre vitesse d'échappement et rapport de masse pour des fusées d'accélérations diverses.*

FIGURE 4 – *Vue de la terre, photographiée d'une altitude de* 160 *km, par une fusée V2 lancée à New Mexico et couvrant plus de* 500.000 *km carrés. La sphéricité de la terre est nettement visible.*

élevées et par suite de périodes faibles de combustion: l'accélération terminale de *Neptune* dépassera 10*g*.

Des deux variables *v* et *R* c'est la première qui est la plus importante, car *R* n'entre dans l'expression que par son logarithme et ses variations ont un effet moindre que des variations similaires de *v*. Avec les moteurs actuels et avec des combustibles du type alcool-oxygène on a atteint des vitesses d'échappement de 2,5 km/s. Il existe des combustibles beaucoup plus puissants, mais on ne sait pas encore comment s'en servir à cause des températures élevées qu'ils produisent. Même les combustibles actuels doivent être dilués pour éviter que la température de la chambre à réaction ne dépasse 3.000° K. Quand on aura surmonté ces difficultés on arrivera peut-être à atteindre en fin de compte des vitesses du jet de 5 km/s. Il y a là un champ de recherches considérable pour chimistes et métallurgistes.

Ce sont des considérations purement mécaniques qui limitent le rapport de masses *R*, principalement le poids mort du moteur et des réservoirs à combustible. Dans le cas du V2 c'était environ 3,5; pour *Neptune*, comme le montre la figure 2, cela dépassera tout juste 4. On pourra peut-être doubler ce rapport avec une fusée simple. Avec un chiffre de 7 nous voyons qu'il serait possible de construire des fusées capables d'atteindre des vitesses de 5 log 7, soit 10 km/s. En admettant une perte de 2 km/s par suite de la résistance de l'air et de la pesanteur, ces fusées pourraient atteindre des altitudes de 6.000 km.

Une telle altitude bien que très considérable par rapport aux altitudes usuelles ne représente jamais qu'une seule fois le rayon de la terre. C'est un problème beaucoup plus difficile, mais nullement insoluble, de dépasser cette altitude et d'atteindre en particulier la « vitesse de fuite ». On s'est beaucoup préoccupé récemment de la possibilité de faire arriver sur la lune une fusée portant des instruments de mesure. En particulier nous pouvons mentionner la proposition de Chapman [3] d'envoyer un magnétomètre sur la lune pour vérifier les idées de Blackett relatives au champ magnétique des corps en rotation.

Il faut pour s'enfuir de la terre une vitesse après combustion totale de 11,2 km/s. On voit sur la figure 3 ce que cela entraîne pour le rapport de masses et la vitesse d'échappement dans le cas de fusées avec diverses accélérations. Les courbes montrent que, pour des combustibles et des moteurs donnant des vitesses de l'ordre de 3 à 4 km/s, il faudra des rapports de masses allant jusqu'à 100 pour atteindre la vitesse de fuite. A première vue il semble tout à fait impossible de construire une fusée pesant par exemple 100 tonnes dont 99 de combustible, tandis qu'il ne resterait qu'une tonne pour le poids total de la structure, des moteurs, des réservoirs et de la cargaison. Toutefois on peut obvier à cette difficulté par le moyen connu sous le nom de fusée à « échelons » ou fusée multiple.

Une grande fusée en transportera une plus petite à une grande altitude, puis retombera sur le sol. Dans ces conditions la composante supérieure se propagera à une grande vitesse avec tout son combustible encore inutilisé. Théoriquement on peut répéter cette opération pour un nombre quelconque d'échelons si bien que l'on peut partir avec une fusée dont la masse initiale est de l'ordre de 100 ou même de 1.000 tonnes et dont la masse finale ne sera que de 2 ou 3 tonnes. De cette façon il serait possible de construire des machines capables d'atteindre la lune ou les planètes même avec des combustibles chimiques. Des études récentes montrent qu'il faudrait un poids initial de peut-être 50 tonnes métriques pour faire arriver une cargaison de 50 kg sur la lune, mais ces chiffres dépendent beaucoup de la vitesse d'échappement supposée.

Il est intéressant de remarquer que la fusée à échelons n'est pas une simple vue de l'esprit. Dans les derniers mois de la guerre on a envoyé sur Anvers d'une distance de 150 km environ vingt projectiles appelés *Rheinbote*. On sait très peu de choses sur cette arme, mais l'on sait que c'était une fusée à quatre échelons.

En résumé, on peut dire que lorsqu'on aura résolu les problèmes de construction et d'adaptation, il sera possible d'envoyer des projectiles pour faire des mesures dans l'espace à des distances immenses et, de plus, d'en recevoir des informations pendant leur vol. Parmi les résultats les plus intéressants auxquels cela conduirait se trouve la possibilité d'obtenir des photographies et des images télévisées de la face cachée de la lune. Il serait moins spectaculaire mais peut-être plus utile de faire circuler des fusées sur des orbites permanentes tout autour de la terre. De ces orbites elles pourraient transmettre par radio les mesures faites par les instruments à des stations au sol pendant de grandes périodes de temps. Un corps se déplaçant horizontalement à la vitesse de 8 km/s juste à l'extérieur de l'atmosphère continuerait à tourner autour de la terre indéfiniment comme un satellite artificiel. Par le choix d'une vitesse convenable on pourrait faire circuler

un corps sur une orbite à telle altitude qu'on voudrait et avec une période de 1½ heures au moins. L'orbite de 24 heures avec son rayon de 42.000 km est susceptible d'applications importantes, car un corps placé sur cette orbite restera toujours fixé au-dessus du même point de la surface terrestre. On aura donc la possibilité remarquable de fixer des instruments scientifiques en permanence dans le ciel, en apparence malgré les lois de la pesanteur. On a suggéré que des stations de retransmission de radio sur ces orbites fourniraient la solution définitive au problème de relais posé par la télévision à longue distance [4].

Il y a quelques années tout cela aurait paru fantastique. Maintenant cela apparaît possible d'ici une dizaine d'années, car ces réalisations ne demandent aucune nouvelle connaissance d'ordre fondamental. Elles vont ouvrir de nouveaux domaines à la science et opèreront peut-être de grandes transformations dans l'astronomie et la physique. Mais même cela peut n'être qu'accessoire, car ces réalisations nous montrent le chemin d'une façon claire et certaine au voyage interplanétaire — peut-être le rêve le plus audacieux jamais conçu par le cerveau humain.

C'est, bien sûr, une tâche beaucoup plus difficile que le simple envoi de projectiles guidés dans l'espace, que de faire arriver des êtres humains sur la lune et d'assurer leur retour à la terre sans accident. La théorie montre que l'on pourrait y aboutir avec des fusées à échelons brûlant des combustibles chimiques, mais les difficultés et les dépenses seraient énormes, car il faudrait au moins une tonne de combustible au départ pour chaque kilogramme à faire revenir.

On convient maintenant d'une manière générale que de vrais vaisseaux de l'espace capables d'atteindre d'autres planètes ne seront possibles que lorsque l'on aura dominé l'emploi de l'énergie atomique pour l'appliquer à la propulsion des fusées — de toutes les applications de l'énergie atomique c'est celle-ci qui apparaît comme la plus difficile. On pourrait sans aucun doute obtenir par des réactions nucléaires assez d'énergie pour n'importe quel voyage interplanétaire. Pour en donner un exemple frappant, les quelques kilogrammes de matière employés dans les bombes de Bikini ont libéré assez d'énergie pour permettre d'envoyer dans la lune et les en faire revenir un millier de tonnes.

Dans les seuls systèmes de fusées atomiques proposés jusqu'à présent [5, 6], on a considéré l'emploi de réactions en chaîne à très haute température, accélérant les courants gazeux dans des gicleurs à propulsion. Pour une température déterminée de la chambre à réactions la vitesse du gaz qui s'échappe de la fusée varie comme l'inverse de la racine carrée de son poids moléculaire. L'impulsion donnée à la fusée par le jet gazeux dépend du moment du jet, c'est à-dire du produit de sa masse par sa vitesse; c'est pourquoi, à masses égales, c'est le gaz de plus faible poids moléculaire qui s'échappe à la plus grande vitesse et produit le moment le plus élevé. Dans la fusée chimique les gaz d'échappement sont en général du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, mais dans une fusée atomique on pourrait travailler avec de l'hydrogène ou de l'hélium, puisqu'il n'y a pas besoin d'une combustion. On pourrait ainsi produire des vitesses d'échappement trois ou quatre fois plus grandes pour des températures égales à celles des modèles précédents avec une diminution considérable des quantités de combustibles nécessaires. Cela entraîne la résolution de problèmes techniques d'une difficulté formidable, mais l'on travaille dans cette direction en Amérique dans le service du NEPA (Nuclear Energy — Propulsion of Aircraft), et peut-être ailleurs. Comme on peut le voir sur la figure 3, si l'on peut atteindre la région de 10 km/s pour la vitesse d'échappement, on pourra réduire le rapport de masses nécessaire pour la fuite de la terre à une valeur réalisable avec un engin à un seul échelon du type actuel. Pour des voyages aller et retour interplanétaires il faudrait pourtant encore des fusées assez grandes, mais il suffirait d'avoir au départ des poids d'une centaine de tonnes au lieu de quelque vingtaines de mille.

BIBLIOGRAPHIE

[1] GODDARD, R. H. «A Method of Reaching Extreme Altitudes» (Smithsonian Misc. Coll., LXXI (1919), No. 2).

[2] OBERTH, H. *Wege zur Raumschiffahrt* (Munich, 1929; U.S.A., 1945).

[3] *Nature*, **160**, 4064 (20 sept. 1947).

[4] CLARKE, A. C. «Extraterrestrial Relays», *Wireless World*, oct. 1945.

[5] SHEPHERD, L. R. «The Problem of Interplanetary Propulsion», *Bulletin of the British Interplanetary Society*, **I**, 9, nov. 1946.

[6] CLEAVER, A. V. «Interplanetary Flight», *Journal of the B.I.S.*, **VI**, 5, juin 1947.

Documentation d'ordre général

[7] LEY, W. *Rockets aud Space Travel* (New York, 1947).

[8] KOOY, J. M. J., et UYTENBOGAART, J. W. H. *Ballistics of the Future* (Haarlem, 1946).

La culture des tissus végétaux

R. J. GAUTHERET

Il y a plus de trente-cinq ans que l'on a mis au point les méthodes employées pour préparer les cultures isolées de tissus animaux, mais la culture des tissus végétaux s'est montrée plus difficile, et ce n'est que peu de temps avant la dernière guerre que l'on avait atteint un succès complet. On trouvera dans cet article la description des méthodes employées pour la culture des tissus végétaux, de l'application de ces cultures à l'étude des problèmes de morphogénèse, de pathologie et de physiologie ainsi qu'à celle des galles des végétaux.

HISTORIQUE

Les premières tentatives d'analyse structurale des organismes conduisirent, voici bientôt trois siècles, a la découverte de la cellule. Des observations ultérieures portant sur des animaux et des végétaux amenèrent les Biologistes à concevoir la théorie cellulaire d'après laquelle la cellule représenterait une unité morphologique et physiologique. Puis les Histologistes de la période classique ayant constaté l'universalité de la structure cellulaire confirmèrent avec éclat le premier point de cette théorie. Mais, ils ne purent en vérifier la seconde partie car, étant donné qu'ils étudiaient seulement des organismes tués et débités en coupes minces, ils furent incapables de démontrer l'individualité physiologique de la cellule.

Pour parvenir à cette démonstration, il fallait en effet prouver que les cellules sont capables de survivre et de se multiplier en dehors de l'organisme. C'est le botaniste Haberlandt qui, le premier, comprit l'intérêt d'une telle expérience. Dès 1902, il essaya de cultiver diverses cellules végétales, cellules épidermiques, cellules de parenchymes etc. Mais il échoua complètement, car les éléments dont il se servait étaient trop différenciés pour pourvoir se multiplier *in vitro*.

Des études similaires réalisées sur des cellules animales furent plus encourageantes. C'est ainsi qu'en 1907 Harrison parvint à entretenir pendant quelque temps la prolifération de fragments de tissus de grenouille et que cinq ans plus tard Carrel réalisa, pour la première fois, la culture indéfinie de fibroblastes de poulet.

Encouragés par ces résultats, les botanistes s'attaquèrent de nouveau au problème de la culture des tissus; mais pendant de nombreuses années leurs essais demeurèrent infructueux et ce n'est qu'en 1922 que l'américain Robbins entrevit enfin la voie qui devait conduire au succès. Il pensa que la réalisation de cultures de tissus végétaux ne serait possible qu'en s'adressant à des cellules capables de proliférer normalement, c'est à dire a des cellules méristématiques. Certaines de ces cellules sont localisées aux extrémités des tiges et des racines de la plante où elles forment de petits massifs compacts, appelés points végétatifs; ce sont ces méristèmes que Robbins entreprit de cultiver. Pour cela, il isola des extrémités de racines et les plaça dans des milieux nutritifs convenables. Elles s'accroissaient rapidement et se ramifiaient, mais leur prolifération cessait au bout de quelques mois. En 1934 White reprit ces tentatives et parvint pour la première fois à obtenir le développement illimité de racines isolées (figure 1). Mais ces cultures de racines représentaient, en réalité, des cultures d'organes possédant une forme et une structure définies et l'on ne pouvait espérer obtenir de cette manière de véritables cultures de tissus.

Pour parvenir à ce résultat, nous avons essayé, dès 1934, de cultiver un type de méristème différent de celui utilisé par Robbins et White. Ce second type de méristème auquel nous avons songé est le tissu cambial qui forme des zones cylindriques localisées dans la profondeur des organes. Il est particulièrement bien développé dans les arbres et grâce à son développement actif il assure la croissance en épaisseur des tiges et des racines. Essayant de cultiver des fragments de tissu cambial nous avons constaté qu'ils s'accroissaient pour donner des masses parenchymateuses dépourvues d'organisation. La prolifération de ces cultures cessait au bout de quelques mois, mais notre tentative avait tout de même fourni des résultats prometteurs; elle suscita de nouvelles recherches qui aboutirent finalement à la réalisation de véritables cultures de tissus.

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES CULTURES DE TISSUS VÉGÉTAUX

Le point de départ d'une culture de tissus végétaux s'obtient généralement en plaçant un

fragment d'organe peu différencié à la surface d'un milieu nutritif convenable.[1] Si l'on s'adresse à un matériel favorable, la prolifération s'installe aussitôt et l'on observe la formation de cals parenchymateux. Des lambeaux d'écorces d'arbres, des tronçons de tiges herbacées ou de lianes (figure 2), des tranches d'organes charnus, etc., peuvent ainsi être cultivés avec succès. La prolifération des explantats est très intense au début de la culture; mais elle se ralentit au bout de quelques mois, puis cesse et finalement les cellules meurent.

Pour prolonger l'activité des cultures, il faut procéder à leur repiquage, c'est-à-dire isoler de l'explantat primitif un fragment de tissu correspondant à une région en voie de croissance rapide et le transporter dans un milieu neuf où il puisse poursuivre son développement. Ce fragment s'accroît alors en tous sens et se transforme peu à peu en une masse plus ou moins arrondie. Au bout d'un à deux mois selon les espèces on procède à un nouveau repiquage et ainsi de suite. On remarque que les colonies tissulaires ayant subi de nombreux repiquages ont un aspect très différent de celui des tissus normaux correspondants, mais présentent cependant une morphologie tout à fait caractéristique qui, pour une même espèce, est invariable (figures 3 et 4).

La méthode dont nous venons d'indiquer sommairement le principe a déjà permis de cultiver les tissus de nombreux végétaux appartenant tous au groupe des dicotylédones. A l'aide de nos collaborateurs nous avons isolé, en effet, près de trente souches différentes dont certaines sont actuellement âgées de plus de dix ans.

Ces souches proviennent de la prolifération de tissus de plantes normales, mais on a pu cultiver également des tissus pathologiques, en particulier des tissus de tumeurs. White à qui l'on doit les premiers travaux réalisés sur cette catégorie de tissus a tout d'abord isolé une souche à partir des « tumeurs génétiques » que produisent spontanément certains hybrides de tabac. Enfin, nous avons nous-mêmes provoqué un étonnant processus tumoral en soumettant des cultures de tissus normaux à un traitement prolongé par des hétéro-auxines. A la suite de ce traitement les cultures se sont comportées comme des cultures tumorales typiques, et en particulier elles ont présenté les principaux caractères morphologiques et physiologiques des cultures de tissus de crown-gall.

[1] Nous indiquerons plus loin la composition générale des milieux utilisés pour les cultures de tissus végétaux.

Dans le but d'établir une comparaison aussi étroite que possible entre les tissus normaux et les tissus tumoraux, les chercheurs se sont efforcés d'obtenir à partir d'une même plante des cultures de ces deux catégories de tissus.

Pour la scorsonère, nous avons même réalisé trois catégories de cultures: des cultures de tissus normaux, des cultures de tissus de crown-gall et des cultures de « tumeurs chimiques » produites par l'action prolongée d'hétéro-auxine.

Les chercheurs ne se sont pas bornés à considérer la morphologie externe des colonies tissulaires, mais ils ont également examiné leur structure anatomique; cet examen a révélé l'existence de deux types d'organisation. Dans des cas assez rares, par exemple pour le saule ou certaines souches de vigne, les colonies sont entièrement parenchymateuses (figure 5) et représentent donc des cultures pures d'un seul type cellulaire; mais le plus souvent, leur structure est hétérogène; elles sont alors constituées par une masse fondamentale de structure parenchymateuse parsemée (figures 6 et 7) de formations libéroligneuses plus ou moins bien individualisées.

BESOINS NUTRITIFS DES CULTURES DE TISSUS VÉGÉTAUX

Les milieux de culture qui permettent la prolifération des tissus végétaux contiennent constamment de l'eau, de la gélose destinée à les solidifier, des sels minéraux, une source organique de carbone (glucose ou saccharose) et, très souvent des traces de quelques substances organiques ayant la valeur de facteurs de croissance (vitamine B_1, glycocolle, acide indole-acétique, cystéine, biotine, acide pantothénique, etc.). Des essais répétés ont établi que tous les tissus ont à peu près les mêmes besoins en sels minéraux et en glucides; mais leurs exigences en facteurs de croissance diffèrent selon les espèces. Certains tissus, par exemple ceux de topinambour, de vigne-vierge, etc., sont incapables de se développer si le milieu ne contient pas d'hétéro-auxine (figure 8) mais prolifèrent avec une grande activité s'il renferme des traces d'acide indole-acétique ou d'une autre hétéro-auxine (figure 9). D'autres, notamment ceux de saule et d'aubépine, sont plus exigeants; leur culture ne peut être obtenue que si le milieu contient les trois facteurs de croissance suivants: acide indole-acétique, biotine et acide pantothénique. D'autres encore, par exemple ceux de carotte et d'endive, peuvent au contraire être cultivés sur un milieu ne renfermant que des

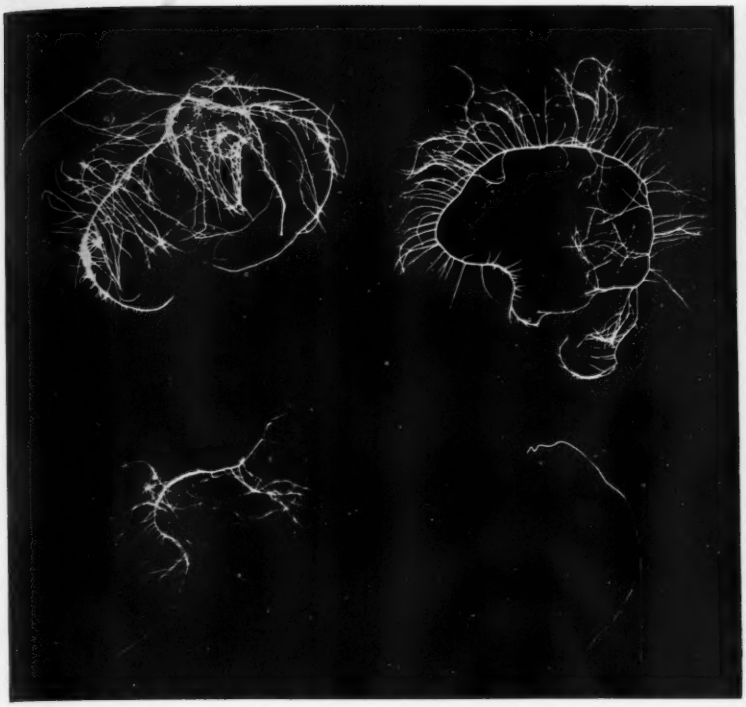


FIGURE 1 – *Cultures de racines isolées (d'après White). Ces photographies représentent des racines isolées provenant de souches ayant subi de nombreux repiquages.*

En haut, à gauche, Petunia. *En haut, à droite,* Trifolium repens.
En bas, à gauche, Nicotiana Langsdorffii. *En bas, à droite,* Daucus carota.

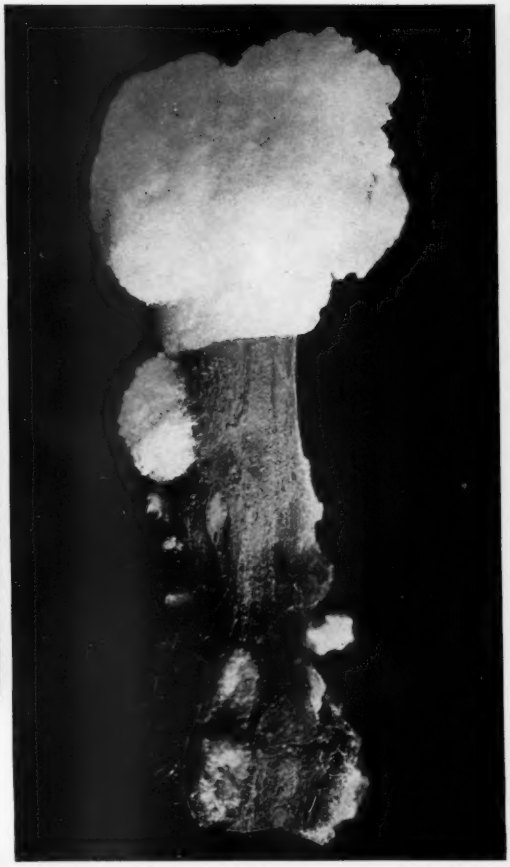


FIGURE 2 – *Fragment de tige de vigne au bout de deux mois de culture. On remarque qu'il s'est développé pour donner une volumineuse protubérance.* (× 5)

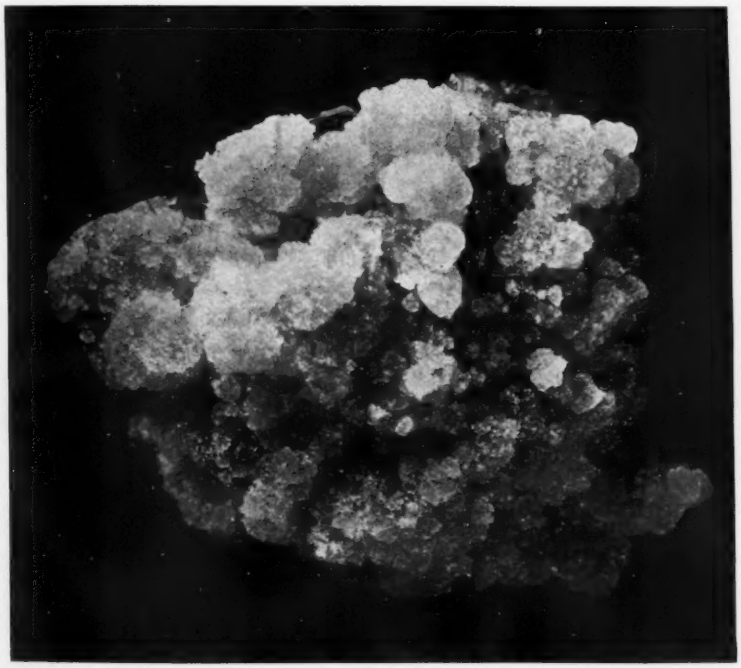


FIGURE 3 – *Culture de tissus de carotte agée de deux mois provenant d'une souche de 10 ans ayant subi 58 repiquages. On constate que la colonie présente une surface mamelonnée garnie de nodules parenchymateux à peu près isolés les uns des autres.* (× 6,5)

FIGURE 4 – *Culture de tissus de vigne, agée de deux mois, provenant d'une souche agée de 3 ans. La surface de la colonie a produit des digitations ressemblant aux veines plasmodiales de certains myxomycètes.* (× 18)

(Vincent, photo d'après Morel)

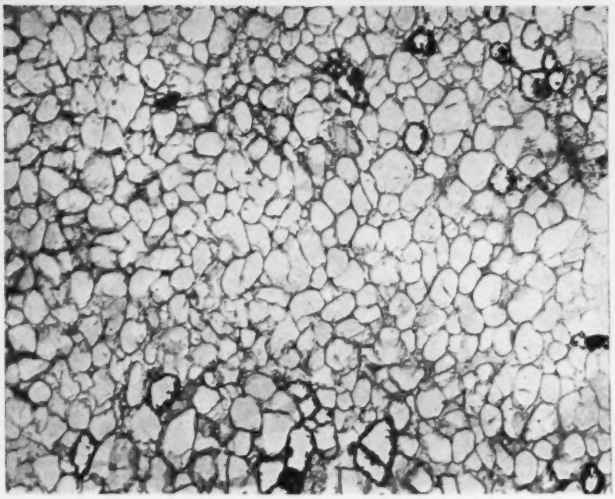


FIGURE 5 – *Coupe pratiquée dans une culture de parenchyme de vigne. Les cellules noires représentent des éléments tanifères dont le tanin a été précipité par le fixateur.* (× 60)

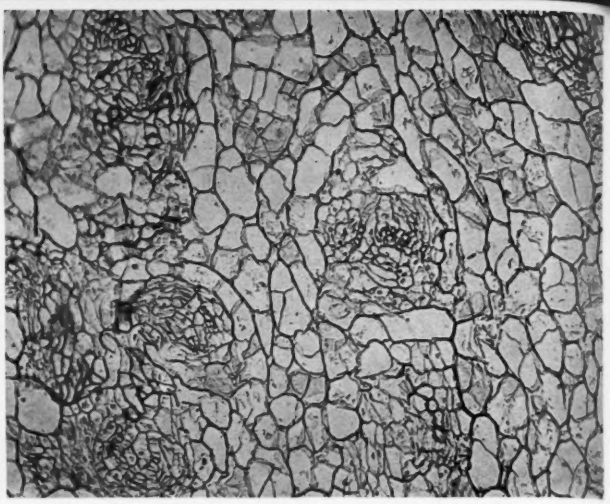


FIGURE 6 – *Coupe pratiquée dans une culture de tissus de topinambour (41 repiquages). La colonie est constituée par un parenchyme renfermant des nodules cribrovasculaires.* (× 80)

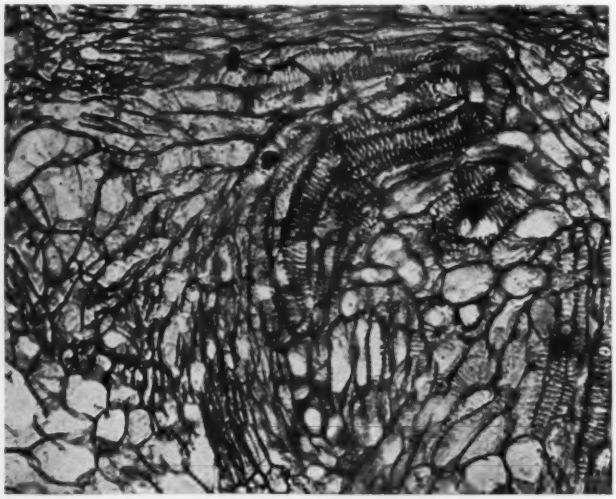


FIGURE 7 – *Détails des formations libérolígneuses développées dans une culture de tissus d'endive. On distingue des éléments lignifiés entourés par des massifs criblés.* (× 300)

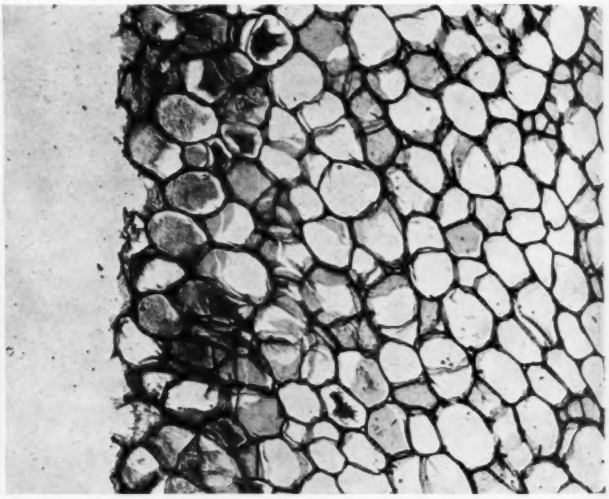


FIGURE 8 – *Coupe pratiquée dans un fragment de tissu de topinambour ayant été cultivé pendant deux mois dans un milieu dépourvu d'hétéro-auxine. Les cellules ne se sont pas multipliées.* (× 90)

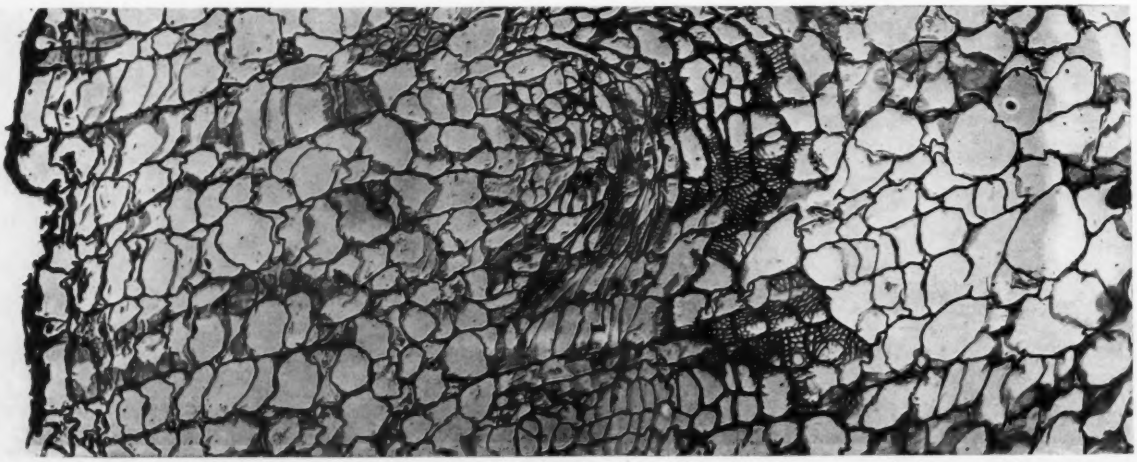


FIGURE 9 – *Coupe pratiquée dans un fragment de tissu de topinambour ayant été cultivé pendant 2 mois dans un milieu renfermant 0,0001 g d'acide indole-acétique par litre. La région superficielle de l'explantat a proliféré pour donner une sorte de parenchyme au sein duquel se sont différenciées des formations libéro-ligneuses.* (× 160)

sels minéraux et du glucose,[1] mais la présence de facteurs de croissance est susceptible de renforcer leur prolifération.

Signalons pour finir que les tissus tumoraux, quelle que soit leur origine (génétique, bactérienne, virologique, chimique) peuvent être cultivés en l'absence d'hétéro-auxine et sont à peu près insensibles à l'action excitoformatrice des substances de ce type.

Des expériences récentes dues à Skoog et à de Ropp permettent de supposer que ce comportement très spécial des tissus tumoraux serait dû au fait qu'ils élaborent une quantité appréciable d'acide indole-acétique.

CULTURES DE TISSUS VÉGÉTAUX ET MORPHOGÉNÈSE

L'observation de cultures de tissus permet d'analyser les conditions du développement des organes de la plante; on a pu préciser par exemple le déterminisme des processus de rhizogénèse en faisant agir des hétéro-auxines sur des tissus cultivés *in vitro*. L'utilisation de cultures de tissus a aussi permis d'étudier les facteurs de la néoformation des bourgeons. Signalons, en effet, qu'au cours de ses recherches sur les cultures de tissus de tabac, White a constaté que la production d'ébauches foliaires est favorisée si les colonies sont immergées dans le milieu nutritif. Ce résultat fut confirmé par Skoog; et ce savant étudia en outre l'action de la lumière, de la température et des hétéro-auxines sur la formation des bourgeons. Il s'attacha également à rechercher dans quelles conditions des organes peuvent fournir des colonies indifférenciées et vice versa. Signalons enfin, que nous avons nous-mêmes étudié le déterminisme du bourgeonnement en nous servant du tissu cambial d'orme.

Pénétrant davantage dans le détail de la morphogénèse, la culture des tissus a permis d'analyser également les processus d'histogénèse. C'est ainsi que des observations anatomiques réalisées sur des cultures de tissus de carotte, de topinambour, d'endive, etc., ont établi que les zones génératrices apparaissent constamment à la limite séparant deux tissus de nature différente. Ces examens ont aussi permis d'analyser le mode de développement des formations cribrovasculaires qui apparaissent au sein de tissus primitivement homogènes. Signalons en outre que des expériences remarquables dues à notre collaborateur M Camus ont établi que des bourgeons greffés *in vitro* exercent une action histogène comportant successivement des processus de dédifférenciation suivis de phénomènes de différenciation et d'organisation.

L'analyse cytologique de ces processus a permis enfin à Buvat de connaître le mécanisme morphologique de la dédifférenciation des cellules des tissus cultivés *in vitro*.

Signalons enfin que grâce à la technique des cultures de tissus on a obtenu des nouvelles précisions sur les phénomènes de polarité. Indiquons notamment que des expériences nombreuses réalisées sur des fragments de racines de carotte et d'endive ont établi que la dissymétrie du développement de la plante résulte d'un mécanisme humoral, caractérisé par le transport d'une substance morphogène dans le sens feuille-racine.

CULTURES DES TISSUS VÉGÉTAUX ET PHYSIOLOGIE

Les résultats obtenus par Robbins, White et Bonner sur des racines isolées ont établi, il y a déjà longtemps, que la prolifération des méristèmes radiculaires exige des sels minéraux, un glucide peu complexe (glucose ou saccharose) et quelques autres substances organiques: glycocolle, vitamine B_1, vitamine B_6, acide nicotinique dont la nature varie d'ailleurs suivant les espèces.

Les recherches poursuivies sur des cultures de tissus ont par contre abouti à des résultats différents. En effet, les tissus cultivés *in vitro* peuvent proliférer en l'absence des substances que nous venons d'énumérer; mais dans certains cas on doit leur fournir d'autres facteurs dont nous avons parlé précédemment: hétéro-auxine, biotine, acide pantothénique.

CULTURES DES TISSUS VÉGÉTAUX ET PATHOLOGIE

Les premiers travaux de cette nature furent l'œuvre de White. Récemment, notre collaborateur M Morel a étendu cette méthode à la culture de certains parasites obligatoires tels que le mildiou et l'oïdium de la vigne.

Signalons pour finir que la technique des cultures de tissus a fourni des résultats fondamentaux dans l'étude des tumeurs végétales et particulièrement dans celle du crown-gall.

[1] Afin d'éviter l'intervention d'impuretés susceptibles de renfermer des facteurs de croissance, on est obligé, dans certaines expériences, de renoncer à la gélose pour solidifier les milieux nutritifs et au coton cardé pour obturer les récipients de culture. On utilise alors comme support solide un ruban de verre imbibé de solution nutritive et, pour fermer les récipients, on se sert de capsules de papier d'étain.

Revue des livres

L'HISTOIRE DES SCIENCES PHYSIQUES

The Growth of Physical Science, *par Sir James Jeans. Pp. x + 364, plus un frontispice et 13 planches. University Press, Cambridge.* 1947. 12*s.* 6*d. net.*

Sir James Jeans ne fut pas seulement un savant de premier ordre mais un homme doué de ce talent rare et digne d'envie qu'est la vulgarisation scientifique. Ses livres populaires de cosmologie eurent et recueillent toujours un très large succès, et ses conférences publiques attiraient des auditeurs en grand nombre. Le livre en question qui retrace les directions principales du progrès en physique (astronomie et mathématiques comprises) recevra certainement le même accueil de ses lecteurs non avertis, car il possède toute la limpidité et le charme de présentation de ses prédécesseurs. L'historien scientifique ne saurait, cependant, porter un jugement entièrement favorable à son sujet. Les grandes lignes sont tracées avec toute l'adresse coutumière de Jeans, et dans les domaines qui lui étaient particulièrement familiers les détails sont précis et bien choisis. On compte, pourtant, beaucoup trop de petites erreurs dans l'ensemble du livre. On nous donne à entendre, par exemple, que l'alchimie cessa d'être pratiquée à Alexandrie après le décret de Dioclétien l'interdisant; un célèbre mathématicien musulman est nommé Al-Kirismi au lieu de Al-Khwarizmi; les Arabes, en effet, empruntèrent leur chiffres à l'Inde, mais aucune mention n'est faite de leur addition fondamentale du zéro; les travaux de Mayow sur la combustion reçoivent un tribut exagéré; et il y a de nombreuses fautes d'impression. Ces erreurs et d'autres semblables, bien que négligeables en elles-mêmes, sont en réalité assez nombreuses pour constituer un grave défaut dans ce qui aurait pu être un excellent ouvrage. Leur correction s'impose pour les éditions et impressions à venir.

TRAJETS DES PARTICULES

Nuclear Physics in Photographs; tracks of charged particles in photographic emulsions, *par C. F. Powell and G. P. S. Occhialini. Pp. viii + 154, plus 50 planches. Oxford University Press.* 1947. 18*s. net.*

La physique nucléaire est devenue, à un tel point, une question de mécanismes compliqués et coûteux — cyclotrons, betatrons, etc., qu'il est reposant de voir qu'il existe une importante section de recherches n'utilisant rien de plus ambitieux qu'une plaque photographique et un microscope. Il est vrai que les plaques utilisées actuellement sont d'un type particulier, mais les tout premiers travaux furent exécutés avec des plaques tout-à-fait ordinaires. On sait depuis longtemps qu'une plaque photographique enregistre le passage de certaines particules ionisantes, telles que les rayons alpha émis par le radium et que, dans des conditions favorables et avec un grossissement suffisant, la trace d'une seule particule apparaît comme une rangée de points très rapprochés dans l'émulsion photographique. Le Dr Powell et ses collaborateurs à Bristol ont fait une étude prolongée de ces effets et ont aussi appliqué cette méthode à l'étude des traces produites dans l'émulsion sous l'action d'autres espèces de radiations.

Cet ouvrage est, quant à son texte, un exposé court et clair des principes fondamentaux de la physique nucléaire, chaque chapitre étant illustré par une série de planches servant d'illustration à ces principes. Ces reproductions sont simplement magnifiques et révèlent les grands progrès réalisés dans la technique, grâce, en grande partie, à l'excellent travail effectué par le personnel de recherche d'Ilford pour la préparation d'émulsions photographiques supérieures. Ces illustrations rendent les procédés de la physique nucléaire extrêmement vivants. A beaucoup de points de vue la méthode est semblable à celle de la chambre de Wilson, mais elle a l'avantage d'enregistrer des phénomènes rares, car la plaque peut emmagasiner ses transformations pendant plusieurs semaines de suite.

Les travaux de Powell ont très récemment démontré avec une certitude presque absolue l'existence de plusieurs espèces « d'électrons lourds » ou mésons, dont la première avait été découverte dans les rayons cosmiques, peu de temps avant la guerre, par Anderson. Il est devenu aussi très vraisemblable qu'il existe également un méson non chargé, sorte de parent pauvre du neutron. Le nombre des particules « élémentaires » augmente ainsi rapidement, et l'ancienne notion simple de proton et électron a disparu. Mais cette complexité croissante est un signe de santé; elle annonce la venue d'une synthèse nouvelle qui, sans aucun doute, ira loin dans la solution des derniers secrets de l'atome.

G. P. THOMSON

LA PALÉOBOTANIQUE

An Introduction to Palaeobotany, *par Chester A. Arnold. 431 pages et 187 figures. McGraw-Hill Publications, Londres.* 1947. 27*s.* 6*d. net.*

Les livres de botanique fossile n'ont jamais été nombreux. Pendant la dernière décade ils ont été, en fait, plutôt rares, car quelques-uns des ouvrages les plus importants se trouvaient épuisés. C'est pour remédier à cette lacune que M le Professeur Arnold de l'Université de Michigan a préparé ce volume. Son but a été d'écrire un livre moderne, concis et cependant suffisamment développé pour l'usage des étudiants et, par là, de faire naître et entretenir l'intérêt pour la paléobotanique, aussi de donner une idée de l'importance et de la valeur de son sujet aux botanistes comme aux géologues. On peut affirmer dès l'abord que l'auteur a admirablement réussi dans sa tâche. Le livre contient de nombreux renseignements du genre de ceux qu'un étudiant avancé désire particulièrement connaître — les techniques à employer dans l'étude des fossiles et comment les indications données éclairent l'évolution des principales classes de plantes. Pour certains exemples, les théories classiques sont conservées, pour d'autres des idées nouvelles sont proposées, ou bien les conclusions sont réservées jusqu'à élargissement de nos connaissances.

Des chapitres spéciaux sont consacrés aux groupes principaux de plantes, comme les anciennes plantes à fleurs, tandis que d'autres traitent de points particuliers tels que la succession géologique des plantes. Le Professeur Arnold, loin d'être pessimiste, avance cependant avec précaution dans les reconstitutions phylogénétiques: « Nous n'avons pas encore pu », dit-il, « reconstituer l'histoire phylogénétique d'un seul groupe de plantes modernes depuis son origine jusqu'à nos jours.» C'est là une vérité qui n'est pas toujours connue.

Il faut féliciter l'auteur pour la production d'un texte particulièrement intéressant et informateur.

C. W. WARDLAW